

# Sommaire

Remerciements

RESUME

Abstract

**LISTE DES FIGURES ..... 5**

**LISTE DES TABLEAUX ..... 9**

**INTRODUCTION GENERALE ..... 11**

## Chapitre I : béton ordinaire

**I.1. Introduction ..... 14**

**I.2. Les composants d'un béton..... 14**

I.2.1. Liants..... 14

I.2.1.1. Les ciments ..... 14

I.2.1.2. Le liant équivalent..... 15

I.2.2. L'eau de gâchage ..... 16

I.2.3. Les granulats ..... 16

I.2.4. Les adjuvants..... 17

I.2.5. Les additions ..... 17

**I.3. Malaxage des constituants ..... 19**

**I.4. Propriétés essentielles d'un béton ordinaire ..... 20**

I.4.1. A l'état frais ..... 20

I.4.1.1. Affaissement au cône d'Abrams [NF P 18-451] ..... 21

I.4.2. A l'état durci ..... 22

I.4.2.1. Essais de compression [NF P 18-406]..... 22

**I.5. Méthode de formulation des bétons ordinaires ..... 23**

I.5.1. Méthode de DREUX-GORISSE ..... 24

I.5.1.1. Choix des données de base..... 24

I.5.1.2. Détermination du rapport C/E..... 25

I.5.1.3. Dosage en ciment ..... 26

I.5.1.4. Dosage en eau ..... 26

I.5.1.5. Détermination des fractions granulaires..... 27

I.5.1.6. Détermination de la composition en volume absolu ..... 28

I.5.2. Méthode de BOLOMEY ..... 29

I.5.3. Méthode de FAURY ..... 29

<b>I.6. Paramètres qui influent sur les caractéristiques du béton ordinaire .....</b>	<b>30</b>
I.6.1. Influence du dosage en ciment.....	30
I.6.2. Influence du rapport eau/ciment.....	31
I.6.3. Influence de l'air occlus .....	34
I.6.4. Influence de la taille maximale du granulats $D_{max}$ .....	35
I.6.5. Influence des additions.....	35
I.6.6. Influence des adjuvants .....	38
<b>I.7. Bilan .....</b>	<b>40</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>41</b>

## **Chapitre II : béton autoplaçant**

<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>44</b>
<b>II.2. Particularités de la composition des BAP .....</b>	<b>44</b>
<b>II.3. Les avantages du béton autoplaçant.....</b>	<b>45</b>
<b>II.4. Caractérisation des BAP à l'état frais .....</b>	<b>46</b>
II.4.1. Présentation des essais de caractérisation des BAP à l'état frais .....	46
II.4.1.1. L'essai d'étalement au cône d'Abrams .....	46
II.4.1.2. L'essai d'écoulement à la boîte en L (L-Box) .....	47
II.4.1.3. L'essai de stabilité au tamis .....	48
II.4.1.4. L'essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel » .....	49
<b>II.5. Caractérisation des BAP à l'état durci.....</b>	<b>50</b>
II.5.1. Propriétés mécaniques .....	50
<b>II.6. Classification des BAP .....</b>	<b>50</b>
II.6.1. Classes d'étalement (Essai d'Etalement).....	50
II.6.2. Classes d'aptitude à l'écoulement (Essai de LBOX).....	50
II.6.3. Classes de résistance à la ségrégation (Essai de stabilité au tamis) .....	51
<b>II.7. Les méthodes de formulation .....</b>	<b>51</b>
II.7.1. Méthode basée sur l'optimisation du mortier .....	52
II.7.1.1. Dosage des gravillons .....	52
II.7.1.2. Dosage du sable .....	52
II.7.1.3. Dosage du liant .....	52
II.7.2.4. Dosage de l'eau et du superplastifiant.....	53
II.7.2. Méthode de formulation chinoise .....	53
II.7.2.1. Calcul du dosage des granulats .....	53

II.7.2.2. Calcul du dosage de ciment .....	55
II.7.2.3. Calcul du dosage en eau.....	55
II.7.3. Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires/approche LCPC .....	56
<b>II.8. Normalisation du béton autoplaçant (la norme NF EN 206-9) .....</b>	<b>56</b>
<b>II.9. Les paramètres influents sur les propriétés des BAP .....</b>	<b>56</b>
II.9.1. Influence des fillers calcaires sur les propriétés des BAP à l'état frais .....	56
II.9.2. Influence des fillers calcaires sur les propriétés des BAP à l'état durci .....	60
II.9.3. Influence de La pouzzolane sur les propriétés des BAP à l'état frais.....	61
II.9.4. Influence de La pouzzolane sur les propriétés des BAP à l'état durci.....	62
II.9.5. Influence du superplastifiant sur les propriétés des BAP .....	64
II.9.5.1. Interactions superplastifiants – ciment.....	64
II.9.5.2. Influence du superplastifiant sur les propriétés des BAP à l'état frais .....	65
II.9.5.3. Influence du dosage en superplastifiant.....	69
II.9.5.4. Effets des superplastifiants à long terme .....	70
II.9.6. Influence des granulats sur les propriétés des BAP .....	70
II.9.7. Influence du rapport E/C sur les propriétés des BAP .....	71
<b>II.10. Bilan.....</b>	<b>73</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>75</b>
<b><u>Chapitre III : Caractérisation des matériaux</u></b>	
<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>80</b>
<b>III.2. Les granulats .....</b>	<b>80</b>
III.2.1. Analyse granulométrique.....	81
III.2.1.1. Le sable.....	81
III.2.1.2. Le gravier .....	84
III.2.2. Propreté des granulats .....	86
III.2.2.1. Essai d'équivalent de sable.....	86
III.2.2.2. Propreté des graviers .....	87
III.2.3. Masses volumiques apparente et absolue .....	88
III.2.4. Résistance à la fragmentation.....	88
III.2.5. Absorption des granulats .....	89
<b>III.3. Le ciment .....</b>	<b>90</b>
<b>III.4. Eau de gâchage .....</b>	<b>91</b>
<b>III.5. Identification du superplastifiant.....</b>	<b>91</b>

<b>III.6. Dosage de saturation .....</b>	<b>93</b>
III.6.1. Essai au mini cône (NF EN 191-1).....	93
III.6.2. Essai au cône de Marsh (NF P 18 358) .....	96
<b>III.7. Fillers calcaires .....</b>	<b>98</b>
<b>III.8. La pouzzolane naturelle .....</b>	<b>98</b>
<b>III.9. Conclusion .....</b>	<b>99</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>100</b>
<b><u>CHAPITRE IV: Partie expérimentale</u></b>	
<b>IV.1. Introduction.....</b>	<b>102</b>
<b>IV.2. Programme expérimental.....</b>	<b>102</b>
<b>IV.3. Confection du béton.....</b>	<b>107</b>
<b>IV.4. Confection des éprouvettes .....</b>	<b>108</b>
IV.4.1. Remplissage des moules .....	108
IV.4.2. Mise en place du béton.....	108
IV.4.3. Conservation des éprouvettes.....	109
<b>IV.5. Caractérisation du béton à l'état frais .....</b>	<b>110</b>
IV.5.1. Caractérisation du béton ordinaire à l'état frais .....	110
IV.5.1.1. L'essai d'affaissement.....	110
IV.5.1.2. L'essai V- funnel.....	111
IV.5.2. Caractérisation du béton autoplaçant à l'état frais .....	112
IV.5.2.1. Essai d'étalement.....	112
IV.5.2.2. Essai de la boîte en « L ».....	115
IV.5.2.3. Essai de stabilité au tamis.....	116
IV.5.2.4. L'essai d'écoulement à l'entonnoir en V « V-Funnel » .....	117
<b>IV.6. Caractérisation du béton à l'état durci.....</b>	<b>118</b>
IV.6.1. Surfaçage des faces de chargement (NF P 18-416).....	118
IV.6.2. Essai de résistance à la compression (NF P 18-406).....	119
IV.6.3. Caractérisation du béton ordinaire à l'état durci .....	120
IV.6.4. Caractérisation du béton autoplaçant à l'état durci .....	121
<b>IV.7. Conclusion .....</b>	<b>122</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>123</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>124</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>126</b>

# LISTE DES FIGURES

FIGURE I.1.ESSAI D’AFFAISSEMENT (BOUKLI HACENE, 2010). .....	21
FIGURE I.2.ESSAI DE COMPRESSION (KHELIFA, 2009). .....	23
FIGURE I.3.ABAQUE PERMETTANT D’EVALUER APPROXIMATIVEMENT LE DOSAGE EN CIMENT A PREVOIR EN FONCTION DU RAPPORT C/E ET DE L’OUVRABILITE DESIREE (AFFAISSEMENT AU CONE) (RAKOTONIAINA, 2007). .....	26
FIGURE I.4.COURBE OPTIMALE TYPE SELON LA METHODE DREUX-GORISSE (BOUKLI HACENE, 2010). .....	28
FIGURE I.5.INFLUENCE DU DOSAGE EN CIMENT SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION A COURT TERME DU BETON (BARON ET OLLIVIER, 1996 CITE PAR BOUKLI HACENE, 2010). .....	30
FIGURE I.6.INFLUENCE DU TYPE DE CIMENT SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION A COURT TERME (BARON ET OLLIVIER, 1996 CITE PAR BOUKLI HACENE, 2010). .....	31
FIGURE I.7.L’INFLUENCE DU RAPPORT E/C SUR LA MANIABILITE (MEFTAH ET ARABI, 2012). .....	32
FIGURE I.8.RELATION ENTRE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION A 28 JOURS ET LE RAPPORT EAU/CIMENT (BOUKLI HACENE, 2010). .....	32
FIGURE I.9.VALEURS DES RESISTANCES EN FONCTION DU RAPPORT C/E (NEVILLE, 2000). .....	33
FIGURE I.10.EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION A 28J DE BETONS CONSERVES A L’EAU EN FONCTION DE L’AFFAISSEMENT ET DU POURCENTAGE D’AIR OCCLUS (BOUKLI HACENE, 2010). .....	34
FIGURE I.11.VARIATION DU BESOIN EN EAU DES MORTIERS C1 (CPJ CEM II/A 42.5) EN FONCTION DE LA FINESSE DES ADDITIONS (BOUDCHICHA, 2007)..	35
FIGURE I.12.VARIATION DES RESISTANCES EN COMPRESSION A 28 JOURS DES MORTIERS C1 (CPJ CEM II/A 42.5) EN FONCTION DU TAUX DE SUBSTITUTION DU CIMENT PAR L’ADDITION (BOUDCHICHA, 2007). .....	36
FIGURE I.13.COMPARAISON DES EVOLUTIONS DES RESISTANCES EN COMPRESSION B.T, BETON TEMOIN ; B.Z., 20, 25, 30, BETON A BASE DE CIMENT POUZZOLANIQUE A UN DOSAGE DE 20, 25, OU 30 % DE POUZZOLANE (BELAS ET COL, 2003). .....	37

FIGURE I.14.EFFET DE LA POUZZOLANE SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION (MOULI ET KHELAFI, 2008).....	38
FIGURE I.15.EFFET DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT SUR L’AFFAISSEMENT (ADJOU DJ ET COL, 2009).....	39
FIGURE I.16.VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION D’UN BETON ADJUVANTE PAR SP1 ET SP2 (ADJOU DJ ET COL, 2009). ....	39
FIGURE II.1.PHENOMENE DE BLOCAGE D’UN GRANULAT AU DROIT D’UN OBSTACLE (KHALIFA, 2009).....	45
FIGURE II.2.SHEMA DU CONE D'ABRAMS POUR LA DETERMINATION DE L'ETALEMENT (KHELIFA, 2009).....	47
FIGURE II.3.MESURE DU TAUX DE REMPLISSAGE (TALEB, 2009). ....	47
FIGURE II.4.ESSAI DE STABILITE AU TAMIS (CUSSIGH, 2007). ....	48
FIGURE II.5.ESSAI DE L’ENTONNOIR EN FORME DE « V » (BENSEBTI, 2008). ....	49
FIGURE II.6.ILLUSTRATION DE L’EFFET FILLER (DIEDERICH, 2010). ....	57
FIGURE II.7.INFLUENCE DU DOSAGE EN ADDITION SUR LA STABILITE AU TAMIS (BOUCETTA ET COL, 2011). ....	58
FIGURE II.8.TEMPS D’ECOULEMENT AU V-FUNNEL EN FONCTION DU POURCENTAGE DE FILLERS CALCAIRES (TALEB, 2009). ....	59
FIGURE II.9.ETALEMENT DES BAP EN FONCTION DU POURCENTAGE DE FILLERS (E/L = 0,50) (TALEB, 2009). ....	60
FIGURE II.10.RESISTANCE A LA COMPRESSION A 28 JOURS EN FONCTION DU POURCENTAGE DE FILLERS (TALEB, 2009).....	60
FIGURE II.11.ÉVOLUTION DU DEGRE D'HYDRATATION EN FONCTION DU DOSAGE EN FILLER (0, 10, 20%) (DIEDERICH, 2010). ....	61
FIGURE II.12.EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DU TEMPS (AISSA ET COL, 2005).....	62
FIGURE II.13.EVOLUTION DES RESISTANCES A LA COMPRESSION DES PATES AUTOPLAÇANTES (BELLIFA, 2012). ....	63
FIGURE II.14.FLOC DE CIMENT EN L’ABSENCE DE REDUCTEUR D’EAU SELON RIXOM ET MAILVAGANAM, 1986 (TIRE DE TALEB, 2009). ....	65
FIGURE II.15.ACTION DES SUPERPLASTIFIANTS–DEFLOCULATION DES GRAINS DE CIMENT (FARES, 2009).....	65
FIGURE II.16.UTILISATION DES SUPERPLASTIFIANTS (DREUX ET FESTA, 1998). 66	

FIGURE II.17.INFLUENCE D'UN SUPERPLASTIFIANT SUR LA RESISTANCE A JEUNE AGE D'UN BETON DOSE A 370 KG/M3 DE CIMENT A MANIABILITE CONSTANTE (SELON MEYER ,1979 CITE PAR BOUTCHICHA, 2007). .....	67
FIGURE II.18.REPULSION ELECTROSTATIQUE ENTRE DEUX PARTICULES DE CIMENT (EL BARRAK, 2005). .....	68
FIGURE II .19.PARTICULES DE CIMENT RECOUVERTES DE POLYMERES A FORT ENCOMBREMENT STERIQUE (EL BARRAK, 2005). .....	68
FIGURE II.20.LA VARIATION D'ETALEMENT EN FONCTION DU RAPPORT E/L (BOUHAMOU ET COL ., 2008).....	72
FIGURE II.21.VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DE L' AGE (TALEB, 2009).....	73
FIGURE III.1.MACHINE A TAMISER ELECTRIQUE.....	81
FIGURE III.2.COURBES GRANULOMETRIQUES DES GRANULATS.....	86
FIGURE III.3.MINI CONE. ....	94
FIGURE III.4.ESSAIS DE MINI CONE.....	94
FIGURE III.5.VARIATION DE L'ETALEMENT DE LA PATE DE CIMENT EN FONCTION DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT. ....	95
FIGURE III.6.CONE DE MARSH (HALLAL, 2011). ....	96
FIGURE III.7.VARIATION DE L'ECOULEMENT DE LA PATE DE CIMENT EN FONCTION DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT. ....	97
FIGURE IV.1.VARIATION DU TEMPS D'ECOULEMENT DU COULIS EN FONCTION DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT (TALEB, 2009).....	104
FIGURE IV.2.MALAXEUR DE BETON. ....	108
FIGURE IV.3.EPROUVETTES A L'ETAT FRAIS. ....	109
FIGURE IV.4.CONSERVATION DES EPROUVETTES.....	109
FIGURE IV.5.MESURE DE L' AFFAISSEMENT DU BETON AU CONE D' ABRAMS. ....	110
FIGURE IV.6.AFFAISSEMENT DES BO EN FONCTIONS DU POURCENTAGE DE FILLER ET DE POUZZOLANE. ....	110
FIGURE IV.7.L'ESSAI DE V-FUNNEL. ....	111
FIGURE IV.8.LE TEMPS D'ECOULEMENT DES BO EN FONCTIONS DU POURCENTAGE DE FILLER ET DE POUZZOLANE.....	111
FIGURE IV.9.L'ESSAI D'ETALEMENT AU CONE D' ABRAMS. ....	112

FIGURE IV.10.ETALEMENT DES BAP EN FONCTION DU POURCENTAGE DE FILLER ET DE POUZZOLANE. ....	113
FIGURE IV.11.LE TEMPS D’ETALEMENT T500 DES BAP EN FONCTION DU POURCENTAGE EN FILLERS ET EN POUZZOLANE. ....	114
FIGURE IV.12.L’ESSAI DE LA BOIT EN L.....	115
FIGURE IV.13.LE TAUX DE REMPLISSAGE DES BAP EN FONCTION DU POURCENTAGE DE FILLER ET DE POUZZOLANE.....	116
FIGURE IV.14.L’ESSAI DE STABILITE AU TAMIS.....	117
FIGURE IV.15.POURCENTAGE DE LAITANCE DES BAP EN FONCTION DU POURCENTAGE DE FILLER ET DE POUZZOLANE.....	117
FIGURE IV.16.LE TEMPS D’ECOULEMENT DES BAP EN FONCTION DU POURCENTAGE DE FILLER ET DE POUZZOLANE.....	118
FIGURE IV.17.DEUX EPROUVETTES APRES SURFAÇAGE.....	119
FIGURE IV.18.ESSAI DE COMPRESSION.....	120
FIGURE IV.19.LA RESISTANCE DES BO EN FONCTION DU POURCENTAGE DE FILLER ET DE POUZZOLANE. ....	120
FIGURE IV.20.LA RESISTANCE DES BAP EN FONCTION DU POURCENTAGE DE FILLER ET DE POUZZOLANE. ....	121



# LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I.1. CLASSE DE CONSISTANCE SELON LA NORME NF EN 206-1.....	21
TABLEAU I.2. AFFAISSEMENT AU CONE D'ABRAMS SELON NF P 18 451(RAKOTONIAINA, 2007). .....	25
TABLEAU I.3. VALEURS APPROXIMATIVES DU COEFFICIENT GRANULAIRE. ....	26
TABLEAU I.4. CORRECTION EN POURCENTAGE SUR LE DOSAGE EN EAU EN FONCTION DE LA DIMENSION MAXIMALE D DES GRANULATS (RAKOTONIAINA, 2007). .....	27
TABLEAU II.1. LES CLASSES D'ETALEMENT SELON LA NORME NF EN 206-1.....	50
TABLEAU II.2. LES CLASSES D'APTITUDE A L'ECOULEMENT SELON LA NORME NF EN 206-1. ....	51
TABLEAU II.3. LES CLASSES DE RESISTANCE A LA SEGREGATION SELON LA NORME NF EN 206-1. ....	51
TABLEAU II.4. LES CLASSES DE VISCOSITE SELON LA NORME NF EN 12350-9. ...	51
TABLEAU III.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE. ....	82
TABLEAU III.2. SPECIFICATION TECHNIQUES POUR LES SABLES. ....	83
TABLEAU III.3. TENEUR EN FINES DE LA FRACTION 0/4 MM. ....	84
TABLEAU III.4. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER 16/25.....	84
TABLEAU III.5. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER 8/16.....	85
TABLEAU III.6. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER 4/8.....	85
TABLEAU III.7. L'EQUIVALENT DE SABLE POUR DEUX EPROUVETTES. ....	87
TABLEAU III.8. RESULTATS DE L'ESSAI SUR LES IMPURETES DES GRAVIERS. ...	87
TABLEAU III.9. MASSES VOLUMIQUES APPARENTES ET ABSOLUES DES GRANULATS. .....	88
TABLEAU III.10. COEFFICIENT LOS ANGELES DES GRANULATS. ....	89
TABLEAU III.11. VALEUR SPECIFIEES SUPERIEURES DU COEFFICIENT LOS ANGELES. ...	89
TABLEAU III.12. LES COEFFICIENTS D'ABSORPTION DES DIFFERENTS GRANULATS. ...	90
TABLEAU III.13. VALEURS SPECIFIEES SUPERIEURES DU COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU. ....	90
TABLEAU III.14. COMPOSITION MINERALOGIQUE DU CIMENT (%). ....	91
TABLEAU III.15. PROPRIETES PHYSICO – MECANQUES DU CIMENT. ....	91
TABLEAU III.16. CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DE L'EAU (BOUKLI HACENE, 2010). ....	91



TABLEAU IV.1.COMPOSITION DU BETON ORDINAIRE (BOUKLI HACENE, 2010).	102
.....	
TABLEAU IV.2.COMPOSITION DU BAP DE REFERENCE (A BASE DE FILLER) POUR 1M <sup>3</sup> .	106
TABLEAU IV.3.COMPOSITION DU BAP POUR LES DIFFERENTS POURCENTAGES EN FILLER CALCAIRES.	106
TABLEAU IV.4.COMPOSITION DU BAP DE REFERENCE (A BASE DE POUZZOLANE) POUR 1M <sup>3</sup> .	107
TABLEAU IV.5.COMPOSITION DU BAP POUR LES DIFFERENTS POURCENTAGES EN POUZZOLANE.	107

# INTRODUCTION GENERALE

Le béton est l'un des matériaux le plus utilisé dans le domaine de la construction : environ 7 milliards de mètre cube de béton sont mise on œuvre annuellement dans le monde. Ce succès est dû à plusieurs facteurs, le béton est un matériau fabriqué à partir de ressources le plus souvent locales, la simplicité de sa fabrication, de sa simple mise en place à l'état frais, de ses propriétés mécaniques à l'état durci.

Plusieurs types de bétons sont apparus ces dernières années, les bétons ordinaires (BO), les bétons à hautes performances (BHP), les bétons autoplaçants (BAP) etc.

Les bétons ordinaires sont des matériaux qui se mettent en place sous l'effet de sollicitations extérieures ou intérieures telles que la vibration. Les bétons autoplaçants de leur côté se comportent comme des fluides plus ou moins visqueux et se mettent en place sous le seul effet de la gravité, sans sollicitation. De ce fait, les deux bétons se comportent de façon différente.

Le béton est un matériau composite et hétérogène composé d'un mélange de deux constituants essentiels : le granulat et la pâte. Le granulat se compose de sable et de gravier. La pâte se compose de liants (ciment portland avec ou sans additions minérales), d'eau, d'adjuvants et d'air. La pâte, agissant comme une colle, durcit et forme une masse qui, du fait de la réaction chimique du ciment et de l'eau (hydratation), prend la consistance de la roche, pour former ce qu'on appelle le béton.

La formulation des bétons autoplaçants se distingue de celle des bétons ordinaires par une présence plus importante du volume de pâte du ciment. En effet, la présence de la pâte remplit les vides et écarte les granulats, minimisant ainsi les frictions et les frottements. Ceci a pour conséquence d'améliorer l'ouvrabilité et l'écoulement du béton. Les BAP contiennent donc une quantité moins importante de gravier, et beaucoup plus de fines. En raison de son hétérogénéité, il est donc indispensable de bien comprendre le rôle de chaque constituant pour pouvoir éclaircir son comportement et d'aboutir à une formulation optimale.

L'enjeu économique de cette recherche est également très important. L'utilisation des ajouts minéraux dans les bétons comme substitut du ciment a des avantages divers dont les principaux se rapportent au fait que le ciment est le composant le plus coûteux du béton que sa production exige une grande consommation d'énergie et que la production d'une tonne de

ciment libère approximativement autant de dioxyde dans l'atmosphère. Les autres avantages comprennent la minimisation des résidus industriels, une réduction de la demande en ressources naturelles par exemple, moins de calcaire pour fabriquer le ciment.

Pour améliorer les performances du béton on ajoute des additions et des adjuvants lors de sa composition, ce qui permettra de diminuer la ségrégation tout en augmentant la cohésion et assuré l'ouvrabilité du béton. Il existe différents types d'additions et d'adjuvants, donc qui sera le bon adjuvant ?, quelle sera la bonne addition ? et quelle est la substitution optimale ?, quelles sont les effets de ces paramètres sur le comportement rhéologique du béton ? sur sa stabilité et ses propriétés mécaniques ?.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier l'influence des additions et des adjuvants sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci des bétons ordinaires et autoplaçants. Pour répondre à cet objectif, nous avons choisis de substituer une partie du ciment par les fillers calcaires et par la pouzzolane naturelle à différents pourcentages en présence de différents types d'adjuvants fluidifiants, afin d'étudier leurs influences sur l'ouvrabilité et la résistance en compression des bétons ordinaires et autoplaçants.

Ce mémoire comporte quatre chapitres. Le premier chapitre fournit une recherche bibliographique sur le matériau béton ordinaire, il présente aussi les composants et les propriétés essentielles d'un béton ordinaire ainsi que, les paramètres qui influent sur ses propriétés.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une revue bibliographique concernant les propriétés des BAP, les essais de caractérisation à l'état frais et à l'état durci, les approches de formulation existantes ainsi que le rôle joué par les différents constituants des BAP à l'état frais et à l'état durci.

Le troisième chapitre présente la caractérisation des différents matériaux utilisés pour la confection des bétons mis en œuvre dans le cadre de cette étude.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons l'ensemble des essais de caractérisation des bétons ordinaires et autoplaçants effectués à l'état frais et à l'état durci.

Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus lors de cette étude ainsi que d'éventuelles perspectives clôturent ce mémoire de fin d'études.

---

# **CHAPITRE I**

## **Béton ordinaire**

---

## **I.1. Introduction**

Le béton est un matériau composite, formé de ciment, d'eau, de granulats (sable et gravillons) et éventuellement d'ajouts (additions ou adjuvants) destinés à améliorer certaines de ses propriétés.

La qualité d'un béton dépend de ses constituants qui ont une influence sur son comportement à l'état frais (ouvrabilité) et ses performances à l'état durci (résistances).

## **I.2. Les composants d'un béton**

Le béton est un mélange de plusieurs composants : liants, eau, sable, graviers et le plus souvent, adjuvants et addition, chaque constituant joue un très grand rôle dans la fabrication du béton et leurs caractéristiques influent sur les propriétés et la destination du matériau.

Le béton est un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes (El BACHIR, 2014) : les masses volumiques dans les bétons courants varient de  $1 \text{ t/m}^3$  (pour l'eau) à  $3 \text{ t/m}^3$  (pour ciment), les dimensions de leurs grains varient de  $0.5 \mu\text{m}$  (grains du ciment) à  $25 \text{ mm}$  (gravillons).

### **I.2.1. Liants**

Les liants hydrauliques sont constitués par les ciments et les chaux hydrauliques. Aujourd'hui, l'emploi de la chaux existe encore mais son emploi se substitue considérablement à l'utilisation du ciment faute de sa prise trop lente et sa faible résistance. Dans cette étude nous ne considérons que les ciments.

On distingue deux sortes de ciments :

- Les ciments proprement dits ;
- Les ciments équivalents.

#### **I.2.1.1. Les ciments**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue souvent d'une couleur grise qui mélangée avec l'eau forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. La norme de référence des ciments courants est la norme européenne EN 197-1 publiée par AFNOR sous la référence NF EN 197-1.

Les ciments sont fabriqués à partir :

- ✓ Du clinker qui est obtenu par cuisson, jusqu'à fusion partielle, d'un mélange dosé et homogénéisé comprenant essentiellement de la chaux, de la silice, de l'alumine et l'oxyde de fer;
- ✓ Du laitier qui est obtenu par refroidissement brusque de la scorie en fusion provenant des hauts fourneaux;
- ✓ De la pouzzolane ou des cendres volantes en provenance des centrales thermiques;
- ✓ Des fillers qui sont obtenus par broyage de roches de qualités convenables et qui, par leur granularité, agissent sur certaines qualités des ciments (maniabilité,...).

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

❖ **Classification des ciments en fonction de leur composition:**

Dans la norme NF EN 197-1, les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion des constituants.

Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

- CEM I: Ciment portland (CPA);
- CEM II: Ciment portland composé (CPJ);
- CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF);
- CEM IV: Ciment pouzzolanique (CPZ);
- CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

**I.2.1.2. Le liant équivalent**

Le liant équivalent est constitué de ciment CPA et d'une addition normalisée venant en substitution partielle du ciment (cendre volante, addition calcaire, laitier vitrifié moulu de haut fourneau, filler siliceux ou fumée de silice).

La norme NF EN 206-1 définit précisément le liant équivalent et les conditions d'emploi des additions par :

- un rapport maximal addition / addition + ciment CPA qui dépend de la nature de l'addition et de la classe de l'environnement ;
- un coefficient K de prise en compte des additions, spécifique à leur nature ;

- le liant équivalent est ainsi défini par la relation :

$$L_{\text{équi}} = C + k A \quad (\text{I.1})$$

- La valeur maximale d'addition prise en compte dans le liant équivalent est fixée par  $A / (A+C)$  ;

Avec

C = le dosage en ciment ;

K = coefficient qui dépend de la nature de l'addition;

A = poids de l'addition utilisée.

### **I.2.2. L'eau de gâchage**

Cette eau est un ingrédient essentiel du béton, joue deux fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau employée pour le gâchage du béton est toujours supérieure à celle nécessaire pour l'hydratation du ciment.

La quantité d'eau introduite dans la composition du béton ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence d'une part sur la qualité du béton, et d'autre part sur la facilité de mise en œuvre. L'eau entrant dans la composition du béton doit être pure.

### **I.2.3. Les granulats**

Les granulats sont des débris rocheux de diamètre compris entre 0 et 125mm, peuvent être d'origine naturelle (sables et graviers de mer et de rivières) ou artificiels (argile expansée). Ils peuvent provenir de la carrière ou extraits du lit de rivières. Ils constituent le squelette du béton et améliorent sa résistance.

#### **❖ Classification des granulats :**

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

La norme française XP P 18-540 donne une définition des principales divisions granulométriques des granulats :

- sables 0/D ou  $1 < D \leq 6,3$  mm ;
- graves 0/D ou  $D > 6,3$  mm ;
- gravillons d/D ou  $d \geq 1$  et  $D \leq 125$  mm.



#### I.2.4. Les adjuvants

La norme NF EN 934-2 définit l'adjuvant comme un produit chimique incorporé au béton à faible dose pour améliorer certaines de ses propriétés, qu'il soit à l'état frais (ouvrabilité) ou à l'état durci. L'incorporation se fait avant ou pendant le malaxage du béton, leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton.

Selon l'effet recherché, on peut distinguer trois grandes familles d'adjuvant : **action sur les délais de prise et de durcissement** ce sont d'une part accélérateurs de prise et de durcissement, et d'autre part les retardateurs. **Action sur la plasticité et la compacité** ce sont les plastifiants et les superplastifiants, **action sur la résistance aux agents extérieurs** ce sont les entraîneurs d'air, les antigels les antigélifs et les hydrofuges de masse.

Ils permettent simultanément de :

- modifier la rhéologie des bétons avec des teneurs en eau nettement inférieures aux bétons non adjuvantés ;
- accélérer ou retarder la prise, selon les exigences ambiantes du chantier ;
- réduire les coûts de mise en œuvre.

Ces qualités justifient qu'ils soient considérés comme un des constituants du béton au même titre que les éléments de base (ciment, granulats, eau) et donc comme un « cinquième » élément à part entière, et permettent aussi de :

- d'optimiser le rapport qualité/prix lors de la formulation des bétons ;
- d'étendre la gamme d'utilisation des bétons.

L'apparition des adjuvants sur le marché a permis la naissance d'une nouvelle génération de bétons (plus durables, pratiquement exempts de porosité) et une plus grande facilité de mise en œuvre des bétons conventionnels.

L'efficacité et les effets secondaires de chaque adjuvant peuvent varier en fonction de son dosage dans le béton et les divers composants de celui-ci, en particulier du ciment.

Les adjuvants qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les superplastifiants et les plastifiants. Pour notre étude, nous nous intéressons seulement aux superplastifiants.

#### I.2.5. Les additions

Une addition minérale est définie comme un matériau finement divisé, ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés.

Selon **EL Barrak (2005)**, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet de remplir les micro-vides entre les granulats, contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau.

On distingue : **Les fillers calcaires, les additions siliceuses, les cendres volantes, les fumées de silice, le laitier de haut fourneau et la pouzzolane.**

Ces particules fines peuvent être contenue dans le ciment ou rajoutées dans le béton lors du malaxage.

Ces fines présentent plusieurs avantages économiques et environnementaux telle que l'incorporation des additions minérales à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des additions minérales dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO<sub>2</sub> de l'industrie cimentière dans La nature (**Tabet, 2012**).

L'activité d'une addition minérale peut avoir deux effets différents :

➤ **effet chimique ou pouzzolanique**

La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante, fumé de silice ou laitier de haut fourneau, la portlandite est produite par l'hydratation du ciment. La réaction pouzzolanique est une réaction qui ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau. L'accroissement de résistance qu'elle provoque prend toute son ampleur pour les longues échéances, dans la mesure où elle a aussi besoin d'hydroxyde de calcium, hydrate sous produit de la formation du C-S-H du clinker.

➤ **Effet filler ou effet de remplissage**

Une addition minérale incorporée dans un mortier ou un béton modifie le squelette granulaire du mélange, qui peut compenser un déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie du volume des vides, la maniabilité du mélange s'améliorant. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance augmente, cet accroissement de la résistance est appelé effet filler.

Les additions sont normalisées selon la norme européenne **EN 206-1**(2004). Il existe deux types d'additions :

Le type I : additions presque inertes ;

Le type II : additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent.

L'incorporation des additions influe fortement sur les propriétés des bétons, elles améliorent leur ouvrabilité et leur mise on place. Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques résultats sur l'influence des additions sur les propriétés du béton.

Dans le cadre de notre étude on intéresse spécialement aux **fillers calcaires et la pouzzolane**.

### **I.3. Malaxage des constituants**

Le malaxage est une phase importante dans la fabrication du béton, car les divers constituants d'un béton sont malaxés de façon à avoir un matériau de composition homogène, ayant par la suite des propriétés uniformes. Ceci se fait soit avec un malaxeur à béton à train valseur qui consiste en un brassage forcé des divers constituants du béton, soit avec une bétonnière qui homogénéise le mélange par gravité en soulevant un volume de matériau et en le laissant par la suite tomber dans la masse. Le choix d'un appareil (bétonnière ou malaxeur) dépend de sa capacité de production, de son aptitude à malaxer différents types de mélanges (secs, pleins, plastiques) pour donner des bétons réguliers.

L'homogénéité du béton est un objectif primordial du malaxage. Les granulats sont d'abord introduits, suivis par les pulvérulents (ciment et/ou addition) et en dernier l'eau et l'adjuvant.

La durée totale du cycle de malaxage couvre l'ensemble des opérations s'écoulant entre le début du remplissage de la cuve et la fin de vidange et sont divisé en trois partie : Le malaxage à sec, le malaxage humide et notamment le temps de malaxage, ces paramètres contrôlent l'évolution de l'homogénéité du mélange, quel que soit le type de malaxeur.

Pour assurer la réussite de cette opération en laboratoire, il est nécessaire d'adopter rigoureusement une même procédure de malaxage des mélanges afin d'avoir des matériaux ayant des propriétés quasi constantes pour chaque gâchée. Cela concerne à la fois le temps de malaxage, la vitesse de malaxage et la séquence d'introduction des constituants dans le malaxeur.

Suivant la norme NF P 18-305, un temps de malaxage minimal de 35 et 55 secondes est respectivement exigé pour les bétons ne comportant pas d'adjuvant ou d'additions.



## **I.4. Propriétés essentielles d'un béton ordinaire**

Les propriétés essentielles pour le béton sont définies comme étant la qualité qui permet de garantir la facilité de sa mise en œuvre; qualité sur laquelle repose différents aspects du béton une fois durci (résistance, enrobage des armatures,...).

Le béton est un matériau composite, économique, résistant au feu et nécessitant peu d'entretien. Il peut répondre à un grand nombre de spécifications : résistance mécanique, notamment à la compression, isolation thermique et phonique, aspect, durabilité, sécurité incendie...

### **I.4.1. A l'état frais**

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend capable de remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité est également désignée sous les termes de maniabilité ou consistance du mélange.

L'ouvrabilité peut se définir comme l'aptitude que peut avoir le béton frais à bien se mettre en place pour le remplissage parfait du coffrage (sans ségrégation) et l'enrobage convenablement des armatures.

L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité, elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais (**GABRYSIA, 2007**).

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité du béton ordinaire : nature et dosage en ciment, forme des granulats, granularité et granulométrie, méthode et durée de transport, emploi d'adjuvants et bien entendu, dosage en eau. L'ouvrabilité a donc indirectement une conséquence sur le prix du béton. Plus l'ouvrabilité demandée est grande plus le béton contient d'eau et de ciment, plus son coût est élevé.

Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par un phénomène de « ressuage », qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation. Les autres conséquences sont : la diminution des résistances, un risque de ségrégation des constituants du béton...

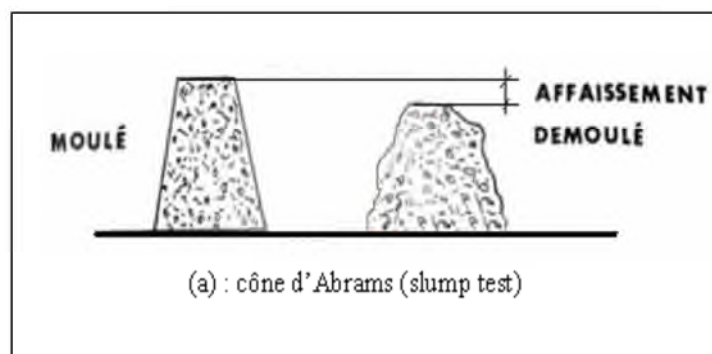
L'ouvrabilité est pour le béton une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition d'un béton, la grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance, sa mesure peut être effectuée facilement sur le chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou « slump test ».

#### I.4.1.1. Affaissement au cône d'Abrams [NF P 18-451]

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très facile à réaliser au laboratoire et au niveau des chantiers. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm. Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume de béton frais sous l'effet de son propre poids, ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. L'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance, plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

Selon la norme NF P 18 -451 l'essai consiste à remplir de béton un moule en tôle tronconique (base de diamètre 20 cm, partie haute de diamètre 10 cm et hauteur de 10 cm), le remplissage du cône est effectué en trois couches piquées avec une tige en acier de 16mm de diamètre et dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche.

On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement. Cet essai est présenté dans la **figure I.1**.



**Figure I.1.**Essai d'affaissement (Boukli Hacene, 2010).

La norme NF EN 206-1 définit d'après l'affaissement, cinq classes de consistance des bétons représentées ci-dessous le (**Tableau I.1**) suivant :

**Tableau I.1.**Classe de consistance selon la norme **NF EN 206-1**.

Classe de consistance	Affaissement en cm
S1 (Ferme)	1 à 4
S2 (Plastique)	5 à 9
S3 (Très plastique)	10 à 15
S4 (Fluide)	16 à 21
S5 (Très fluide)	≥ 22

## **I.4.2. A l'état durci**

Le béton durci est défini comme un solide hétérogène formé de granulats enrobés par une pâte de ciment. Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois. La caractéristique essentielle d'un béton à l'état durci est sa résistance à la compression à un âge donné. La connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul et le dimensionnement des ouvrages.

La résistance du béton à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance à la compression. Cette résistance a été la plus étudiée, parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydraté.

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance dépend d'un certain nombre de paramètres :

- l'âge et conditions de conservation ;
- la pâte liante :
  - rapport eau/ciment ;
  - type et dosage du ciment ;
  - présence d'additions minérales ;
- l'adhérence pâte-granulats ;
- la résistance propre du granulat ;
- la porosité du béton.

La résistance du béton en compression est une propriété qui continue d'augmenter plusieurs années après la production du béton. Le choix de réaliser le test à 28 jours d'âge n'est que purement normatif. Cette durée ne signifie pas que les réactions d'hydratation du ciment sont terminées.

### **I.4.2.1. Essais de compression [NF P 18-406]**

Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , jusqu'à l'échéance de l'essai.

L'essai de compression sur les éprouvettes de béton a été réalisé conformément à la Norme NF P 18-406. Dans ce cas l'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est égale au rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

L'équipement nécessaire à l'essai de compression du béton comprend une presse de force et de dimensions appropriée répondant aux normes NF P 411 et NF P 412 et un moyen pour la rectification des extrémités des éprouvettes tels que le **surfaçage au souffre** ou a **la rectifieuse**. Pour réaliser l'essai de compression des bétons, on doit placer l'éprouvette séchée et rectifiée dans la presse et la centrer en utilisant un gabarit de centrage, procéder à la mise en charge progressive et enregistrer la charge de rupture (la charge maximale enregistrée au cours de l'essai).

L'essai a été réalisé sur **trois (03) d'éprouvettes**, et la valeur de la résistance considérée constitue **la moyenne** de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

Le temps d'attente entre le moment où les éprouvettes sont sorties de l'eau et celui de l'exécution de l'essai de compression ne doit pas dépasser une heure, afin d'éviter la dessiccation des éprouvettes, sinon, des précautions doivent être prises.



**Figure I.2.**Essai de compression (Khelifa, 2009).

### **I.5. Méthode de formulation des bétons ordinaires**

Il existe plusieurs méthodes de formulation telle que : La méthode de BOLOMEY, méthode de DREUX-GORISSE, méthode de FAURY, méthode de JOISEL, méthode de VALETTE, méthode de BARON, méthode de CAQUOT et méthode d'ABRAMS etc.

Parmi les méthodes de formulation les plus répandues, nous citons :

- Méthode de DREUX-GORISSE ;
- Méthode de BOLOMEY ;
- Méthode de FAURY.

### **I.5.1. Méthode de DREUX-GORISSE**

Cette méthode est de nature fondamentalement empirique, Elle consiste à déterminer les quantités optimales de matériaux (eau, ciment, sable, gravillon et gravier) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton.

Dreux a mené une large enquête pour recueillir des données sur des bétons satisfaisants (**De Larrard, 2000**). Sur la base d'une analyse statistique de ce grand nombre de bétons et en combinant les courbes granulaires obtenues, ils ont pu fonder une approche empirique pour déterminer une courbe granulair de référence ayant la forme de deux lignes droites dans un diagramme semi-logarithmique (**AYAD et BARKA, 2013**).

Elle est d'autre part, très simple d'utilisation puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés (**Dupain et col, 2000**). Il s'agit ensuite d'exécuter quelques essais sur ce béton pour apporter à cette formule les corrections expérimentales nécessaires. Le mode opératoire est le suivant :

#### **I.5.1.1. Choix des données de base**

##### **❖ Nature de l'ouvrage :**

Il est nécessaire de connaître les dimensions de l'ouvrage, et si le béton est non armé ou armé ou il s'agit d'un béton précontraint. Dans le cas du béton armé et précontraint, il est indispensable de connaître les dispositions des armatures et l'intensité du ferrailage.

##### **❖ Résistance :**

Elle est en générale définie par la résistance en compression sur cylindre à 28 jours. Par sécurité, la résistance visée doit être majorée de 15% par rapport à la résistance que l'on souhaite obtenir. Ainsi la résistance visée doit être obtenue comme suit :

$$\sigma'_{28j} = \sigma_{28j} + 0.15 \sigma_{28j} \text{ soit : } \sigma'_{28j} = 1.15 \sigma_{28j} \quad (\text{I.2})$$

$\sigma_{28j}$  : La résistance désirée pour le béton à 28 jours en MPa.

$\sigma'_{28j}$  : La résistance visée pour le béton à 28 jours en MPa.

##### **❖ Consistance :**

Cette spécification est définie par rapport à l'affaissement moyen au cône d'Abrams ou au test C.E.S. comme indiqué dans le **tableau I.2**.



**Tableau I.2.**Affaissement au cône d'Abrams selon NF P 18 451(RAKOTONIAINA, 2007).

Plasticité	serrage	Affaissement A en cm
Béton ferme	Bonne vibration	0 à 4
Béton plastique	Vibration courante	5 à 9
Béton très plastique	Piquage	10 à 15
Béton liquide	Léger piquage	≥ 16

❖ **Dimension maximale D des granulats :**

Dans l'application de la méthode de Dreux-Gorisse, la valeur D retenue sera telle que le refus sur le tamis correspondant soit le plus proche possible de 8%. La dimension des gros granulats dépend de l'ouvrage à réaliser.

**I.5.1.2. Détermination du rapport C/E**

La formule ci-dessous (relation de Bolomy) permet le calcul de la résistance à la compression visée à 28 jours, soit:

$$\sigma'_{28j} = G F_{CE} \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (I.3)$$

Avec :

$$\frac{C}{E} = \frac{\sigma'_{28j}}{G F_{CE}} + 0.5 \quad (I.4)$$

$F_{CE}$  : classe vraie du ciment à 28 jours en MPa ;

G : coefficient granulaire ;

C : dosage en ciment (en kg/ m<sup>3</sup>) ;

E : dosage en eau totale sur matériaux secs (en l/ m<sup>3</sup>).

❖ **Choix approprié du coefficient granulaire G :**

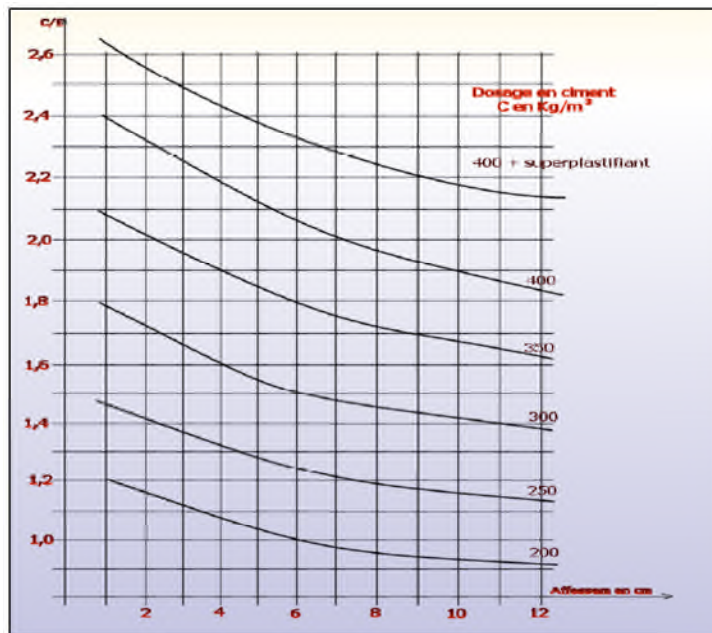
G est un coefficient granulaire sans dimension dont la valeur est choisie dans le tableau suivant :

**Tableau I.3.** Valeurs approximatives du coefficient granulaire.

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	$D \leq 16 \text{ mm}$	$25 \leq D \leq 40 \text{ mm}$	$D \geq 63 \text{ mm}$
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

### I.5.1.3. Dosage en ciment

Connaissant le rapport  $\frac{C}{E}$  et l'affaissement au cône d'abrams souhaité A, on en déduit grâce à l'abaque présenté dans la **figure I.3**, le dosage en ciment correspond.



**Figure I.3.** Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône) (RAKOTONIAINA, 2007).

### I.5.1.4. Dosage en eau

Elle est calculée à partir de la quantité de ciment déterminée précédemment et du rapport C/E. Mais cette valeur de E est particulièrement applicable aux bétons pour les quelles  $D = 25 \text{ mm}$ . Pour les D différents de 25 mm, il faudra alors prétendre à une correction par l'eau libre contenue dans les matériaux granulaires comme nous montre le **tableau I.4**.

**Tableau I.4.** Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (RAKOTONIAINA, 2007).

Dimension maximale des granulats D en mm	1,25	2,5	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau (en %)	+30	+22	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

#### I.5.1.5. Détermination des fractions granulaires

##### ❖ Tracé de la courbe granulaire de référence :

On trace une courbe granulaire de référence OAB (**figure I.4**) sur le même graphe d'analyse granulométrique (pourcentage des tamisats en fonction du module ou diamètre des tamis), telle que :

Le point O est repéré par ses coordonnées : [0.063 ; 0]

Le point B est repéré par ses coordonnées : [D ; 100%] Avec D : le diamètre du plus gros granulats.

Le point de brisure A correspond aux coordonnées suivantes :

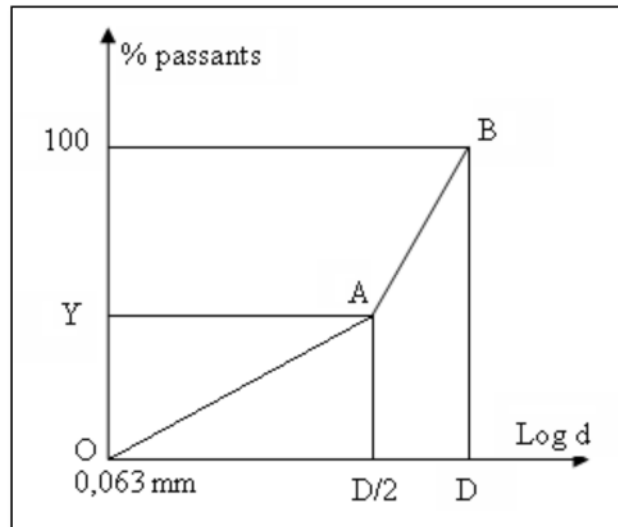
- Abscisse :
  - Si  $D < 20$  mm l'abscisse est  $D/2$  ;
  - Si  $D > 20$  mm l'abscisse est située au milieu du « segment gravier » limité par le module 38 (5mm) et le module correspond à D.

- Ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K \quad (I.5)$$

K : est un terme correcteur dépendant du dosage du ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats : roulés ou concassés, et du module de finesse du sable.

Une correction supplémentaire sur K peut être effectuée (cas de sables grossiers) en ajoutant la valeur  $KS = 6Mf - 15$  (étant le module de finesse du sable qui varie de 2 à 3).



**Figure I.4.** Courbe optimale type selon la méthode Dreux-Gorisse (Boukli Hacene, 2010).

❖ **La ligne de partage :**

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulaire du plus petit granulat au point d'ordonnée 5% de la courbe granulaire du plus gros granulat. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum (OAB) indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et de gravier.

**I.5.1.6. Détermination de la composition en volume absolu**

❖ **Volume absolu de l'ensemble des granulats :**

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V = 1000\gamma - v_c \quad (I.6)$$

Où  $v_c = \frac{C}{\rho C}$  qui exprime le rapport entre le dosage en ciment et masse volumique du ciment.

$\gamma$  : est le coefficient de compacité qui est fonction de D max, de la consistance et de l'efficacité de serrage.

❖ **Volume absolu du sable :**  $V_s = S\% \cdot V \quad (I.7)$

❖ **Volume absolu du gravier :**  $V_g = G\% \cdot V \quad (I.8)$

Le dosage en masse des éléments secs (granulats, sable) pour  $1\text{m}^3$  de béton sont donnés par :

$$\text{❖ Masse de sable : } M_s = V_s \cdot \rho_s \quad (\text{I.9})$$

$$\text{❖ Masse de gravier : } M_g = V_g \cdot \rho_g \quad (\text{I.10})$$

$\rho_s$  : masse volumique absolu du sable.

$\rho_g$  : masse volumique absolu du granulats.

### I.5.2. Méthode de BOLOMEY

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris) , dont la courbe soit la plus proche que possible de la courbe de référence théorique (**Dreux, Festa, 1998**).

$$P = A + (100 - A)\sqrt{d/D} \quad (\text{I.11})$$

Avec :

P : le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d.

D : le diamètre du plus gros grain.

A varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort. Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue.

### I.5.3. Méthode de FAURY

Selon (**ELBAHIR ,2014**) Faury proposa une nouvelle loi de granulation du type continu, il s'est inspiré pour cela de la théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen.

La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de  $\sqrt[5]{d}$ . La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite, cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ( $<D/2$ ), des gros grains ( $>D/2$ ) et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace pour l'ensemble du mélange, ciment compris une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse  $\sqrt[5]{d}$ .

L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à  $D/2$  et son ordonnée  $Y$  est donnée par la formule suivante :

$$Y = 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75} \quad (\text{I.12})$$

$B$  : Varie de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou.

$D$  : Exprimé en dimension de passoire.

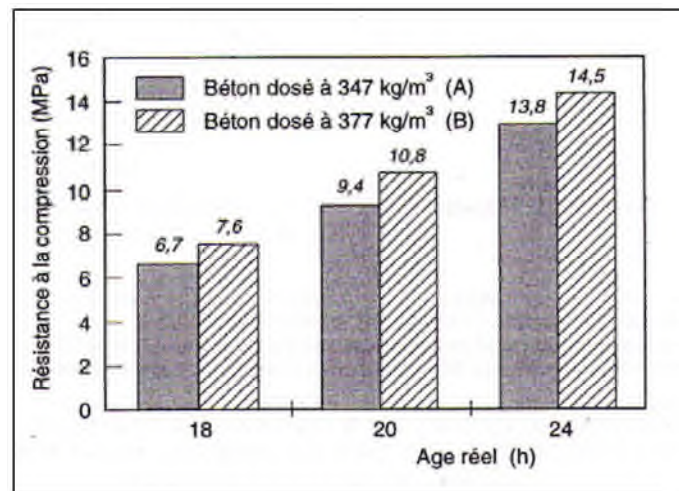
$R$  : Le rayon moyen du moule.

## I.6. Paramètres qui influent sur les caractéristiques du béton ordinaire

### I.6.1. Influence du dosage en ciment

Pour un même dosage en eau, l'augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport  $E/C$  du béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance à court terme.

La **figure I.5** montre l'influence du dosage en ciment sur les résistances à court terme et sur le rapport  $E/C$  du béton.

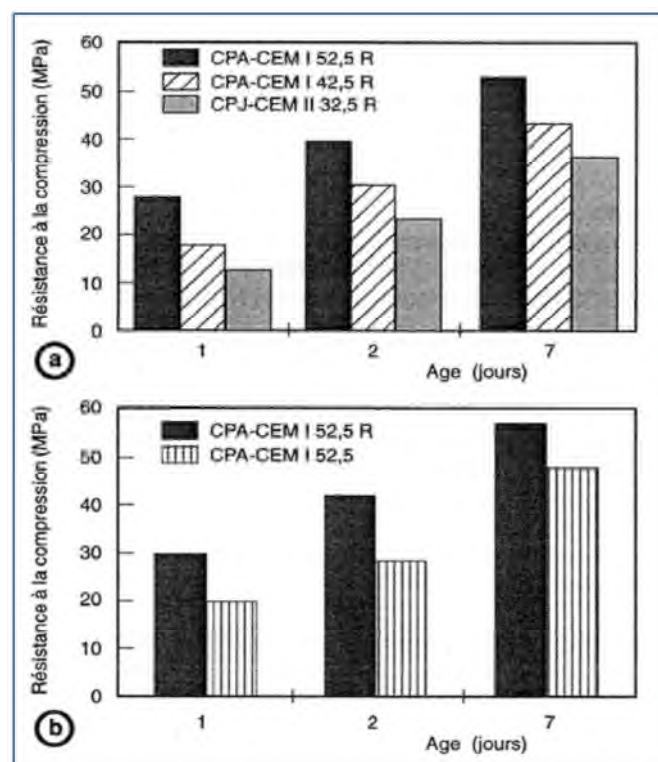


**Figure I.5.** Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton (Baron et Ollivier, 1996 cité par **Boukli Hacene, 2010**).

Cette figure montre clairement l'accroissement des résistances d'un béton avec l'augmentation de son dosage en ciment.

La résistance d'un béton à court terme dépend aussi le type et la classe de résistance de ciment, plus cette classe est élevée, plus la résistance à la compression est élevée, à toutes les échéances.

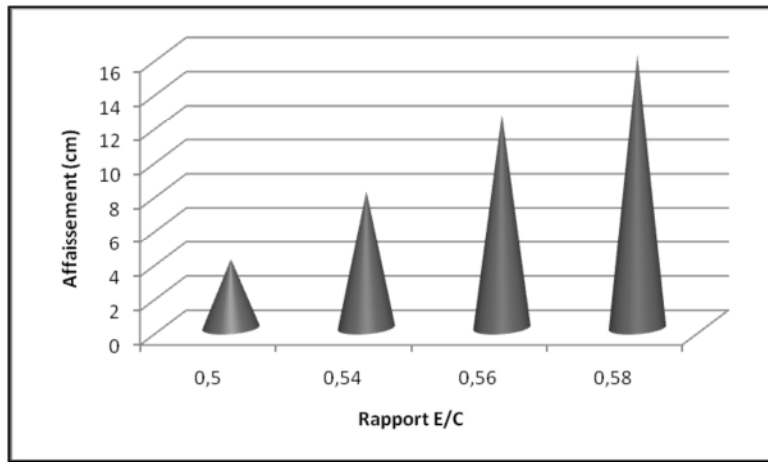
L'influence de ce paramètre sur la résistance à court terme est présentée sur la **(figure I.6)**. Cette figure montre que le choix d'un ciment CPA-CEM I 52,5 R développera, à dosage identique dans le béton, des résistances à court terme considérablement supérieures à celles d'un ciment CPJ-CEM II 32,5 R. De même, un CPA-CEM I 52,5 R développe des résistances à court terme beaucoup plus rapidement qu'un CPA-CEM I 52,5, tout en présentant à 28 jours des résistances équivalentes.



**Figure I.6.** Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme (Baron et Ollivier, 1996 cité par Boukli Hacene, 2010).

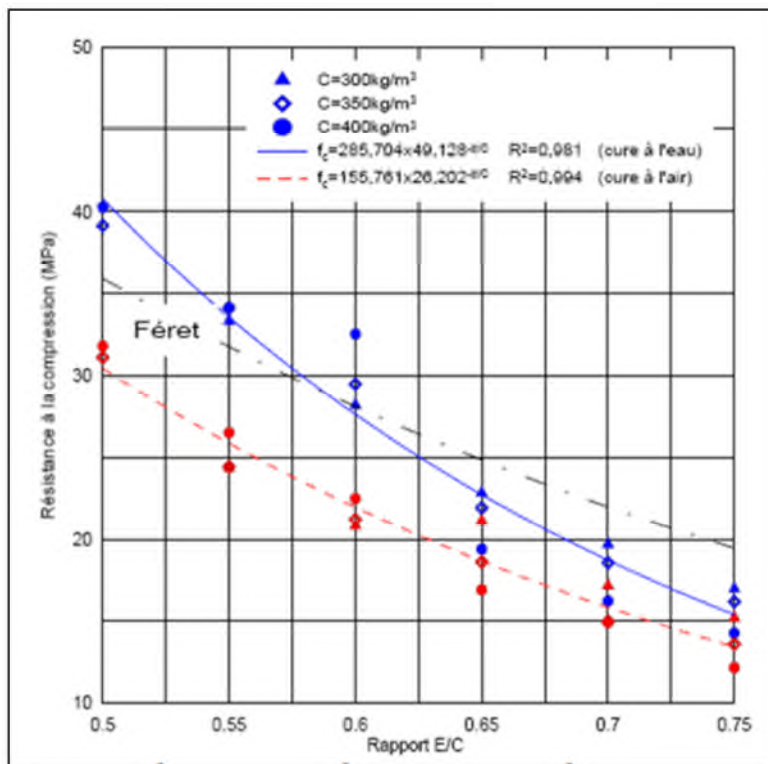
### I.6.2. Influence du rapport eau/ciment

La **figure I.7** montre l'évolution de la maniabilité en fonction du rapport E/C. Le constat général qui se dégage est que l'affaissement au cône augmente lorsque le rapport E/C croît. Le rapport E/C de 0,54 semble le plus approprié pour un béton courant et donne un affaissement de consistance plastique, valeur ciblée dans la formulation. Le rapport E/C de 0,58 donne une ouvrabilité trop plastique voire mou.



**Figure I.7.**L'influence du rapport E/C sur la maniabilité (Meftah et Arabi, 2012).

Le rapport E/C est le facteur le plus important qui conditionne la résistance à la compression d'un béton. Boukli (2010) a montré que la courbe représentant la résistance en fonction du rapport E/C a approximativement la forme d'une hyperbole et cette relation dépend très peu du dosage en ciment (Figure I.8).

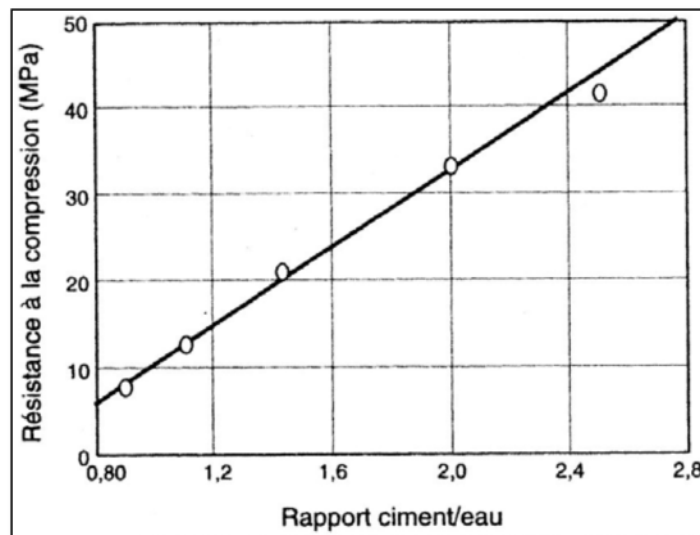


**Figure I.8.**Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport eau/ciment (Boukli Hacene, 2010).



Pour un même dosage en ciment, l'augmentation du dosage en eau du béton aura pour conséquence de augmenter le rapport E/C du béton, ce qui se traduira nécessairement par une diminution de la résistance.

Cependant d'autres auteurs (**Alexander et Ivanusec, 1982 ; Kakizaki, 1992**) ont montré que la relation était plutôt linéaire pour des valeurs du rapport C/E compris entre 1.2 et 2.5 (**figure I.9**).



**Figure I.9.** Valeurs des résistances en fonction du rapport C/E (**Neville, 2000**).

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton à l'état frais et entraîne la diminution de la résistance mécanique du béton à l'état durci.

Le dosage en ciment est très souvent relié aux propriétés mécaniques du béton et à sa durabilité. On considère aussi que l'écoulement et l'ouvrabilité du béton sont reliés au rapport E/C. La formulation des bétons ordinaires doit impérativement passer par l'optimisation de ces paramètres.

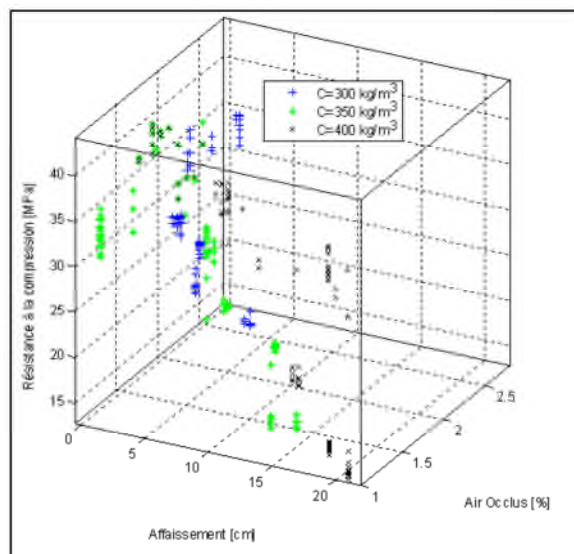
Le rapport E/C conditionne aussi la porosité de la matrice cimentaire du béton durci, qui est un paramètre qui influe beaucoup sur la durabilité du béton (**Ollivier et BUIL, 1992**).

### I.6.3. Influence de l'air occlus

L'air occlus est dû au volume d'air entraîné au sein du matériau lors des opérations de malaxage et qui reste piégé dans le béton après la mise en œuvre. Cette quantité d'air occlus dans le béton frais est mesurée à l'aide d'un aéromètre.

La **figure I.10** montre l'évolution de la résistance à la compression à 28 jours de bétons conservés à l'eau en fonction de l'affaissement et du pourcentage d'air occlus. Il est clair, que le pourcentage d'air occlus décroît avec l'augmentation de l'affaissement qui est due à l'influence du rapport E/C, c'est-à-dire, lorsqu'on passe des bétons fermes aux bétons fluides. Cet air affectera aussi la résistance à la compression, lorsque la teneur en air augmente, la résistance à la compression des bétons diminue.

Le pourcentage d'air occlus est important dans les bétons fermes et tend vers la valeur 1% pour les bétons très plastiques à fluides. Pour l'affaissement maximum de 21 cm, il correspond un pourcentage d'air occlus mesuré de 1 %, cette quantité occupant le même volume que dix litres d'eau, réduit pareillement la résistance à la compression.



**Figure I.10.** Evolution de la résistance à la compression à 28j de bétons conservés à l'eau en fonction de l'affaissement et du pourcentage d'air occlus (**Boukli Hacene, 2010**).

#### I.6.4. Influence de la taille maximale du granulat $D_{max}$

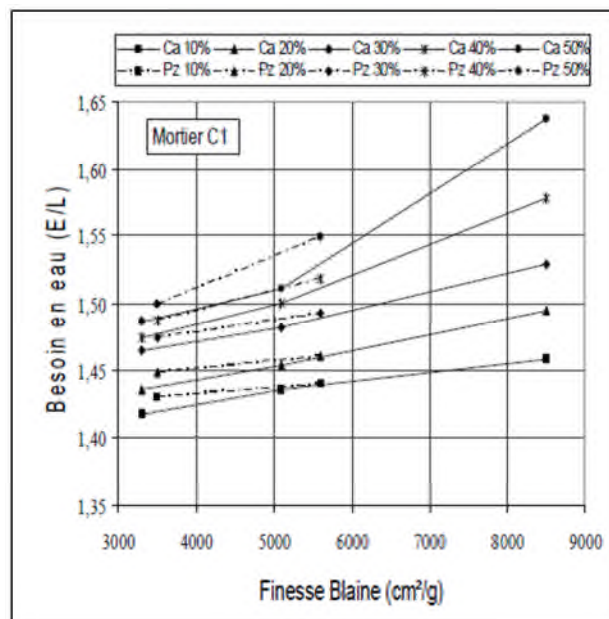
Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage, l'épaisseur de la pièce, l'ouvrabilité demandée, l'espacement et l'enrobage des armatures, la possibilité et l'efficacité du serrage à la mise en œuvre, risque de ségrégation, etc.

L'utilisation des granulats de dimension maximale contribue de façon très significative à l'augmentation de la résistance du béton. Mais cela reste dans les limites de la faisabilité, parce que le choix de  $D_{max}$  reste conditionné par les paramètres décrit au dessus.

Il est généralement admis que la dimension  $D_{max}$  soit **cinq fois plus petite** que la plus petite dimension de l'élément à réaliser.

#### I.6.5. Influence des additions

En général, l'augmentation de la quantité de particules fines dans un béton accroît la demande en eau pour le maintien de son ouvrabilité, puisqu'il faut davantage d'eau pour enrober et donc lubrifier les grains.



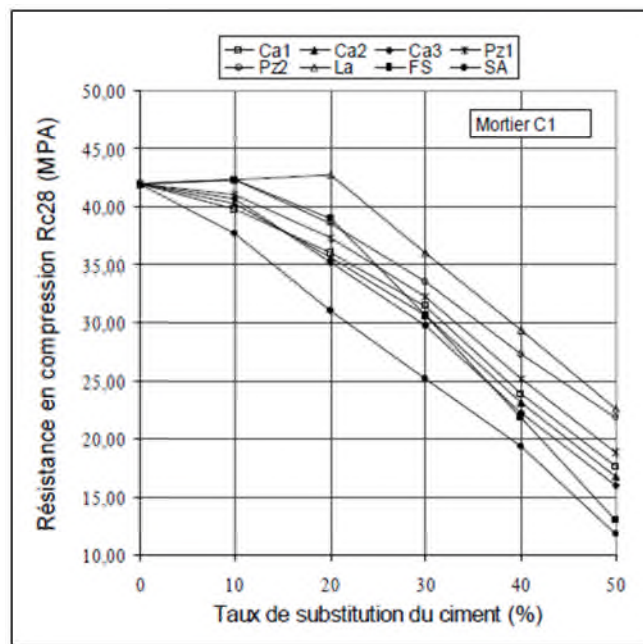
**Figure I.11.** Variation du besoin en eau des mortiers C1 (CPJ CEM II/A 42.5) en fonction de la finesse des additions (BOUDCHICHA, 2007).

BOUDCHICHA (2007) a remarqué que le besoin en eau des mortiers avec additions est d'autant plus important que la finesse des particules d'additions est grande, et il est d'autant plus important que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand. Ceci peut être

parfaitement expliqué par le fait que l'introduction des additions minérales de finesse plus importante que celle du ciment utilisé, entraîne une augmentation de la surface à lubrifier.

Le besoin en eau est plus important pour les mortiers avec additions de pouzzolanes que pour les mortiers avec additions calcaires, ceci est d'autant plus vrai que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand et que la finesse de l'addition est importante.

La **figure I.12** montre que lorsque le taux de substitution du ciment par l'addition augmente, la résistance diminue.



**Figure I.12.** Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 (CPJ CEM II/A 42.5) en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition (**BOUDCHICHA, 2007**).

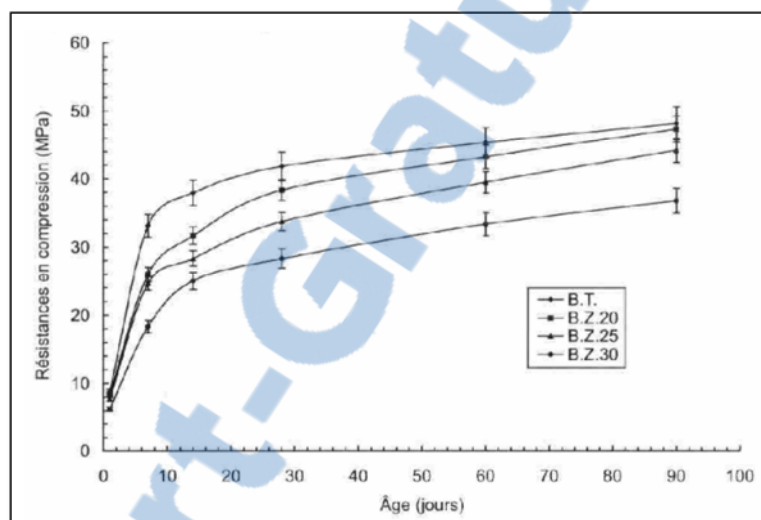
**GOUFI et col. (2011)** ont fait une étude sur l'effet de la pouzzolane de Beni- Saf sur la durabilité des bétons. Cette étude fait état des résultats expérimentaux permettant l'évaluation de la durabilité du béton contenant une pouzzolane naturelle Algérienne.

Les résultats obtenus aux cours de cette étude ont montré que cette pouzzolane, utilisé en remplacement d'un ciment de type CEM II/A, permet de maintenir les mêmes performances que lorsque ce ciment est utilisé seul. Ces performances sont principalement dues à la modification de la microstructure de la pâte de ciment dans le sens d'un accroissement de compacité.

Même après 90 jours de conservation dans un milieu plus ou moins agressif (sulfates), les caractéristiques des bétons pouzzolaniques ne sont pas affectées par les dégradations, à cause de la compacité très élevée qui empêche la pénétration des agents agressifs.

Ainsi, les résultats de cette étude montrent la nécessité d'utiliser la pouzzolane naturelle de Béni Saf en substitution au ciment vu que, les performances mécaniques des bétons dans lesquels elle a été incorporée restent analogues sinon meilleures à celles d'un béton témoin d'où un avantage économique et écologique considérable.

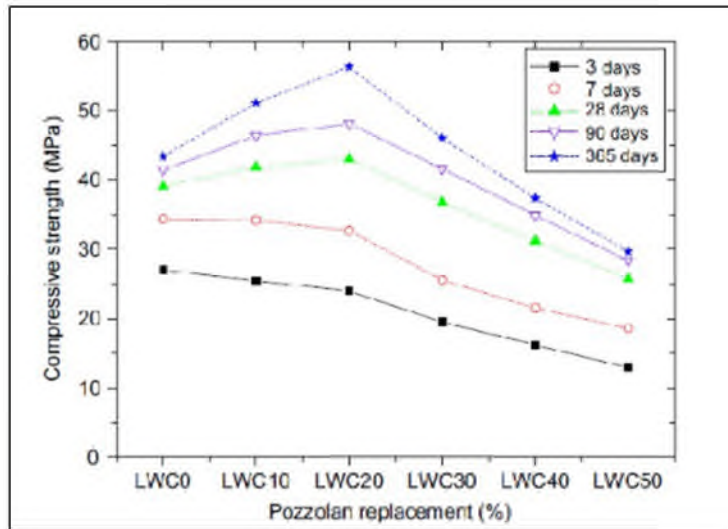
La **figure I.13** présente l'évolution des résistances mécanique en compression des bétons à la pouzzolane naturelle, suivant des proportions variantes à hauteur de (0%, 20%, 25%, et 30%).



**Figure I.13.** Comparaison des évolutions des résistances en compression B.T, béton témoin ; B.Z., 20, 25, 30, béton à base de ciment pouzzolanique à un dosage de 20, 25, ou 30 % de pouzzolane (**Belas et col, 2003**).

D'après cette figure on remarque l'augmentation de la résistance mécanique aux différents âges de durcissement pour tous les bétons pouzzolaniques. Le pourcentage de 20 % donne, à long terme, des performances mécaniques pratiquement analogues à celles du béton témoin.

La **figure I.14** présente l'effet du taux de substitution de la pouzzolane sur la résistance à la compression des bétons aux différentes échéances.



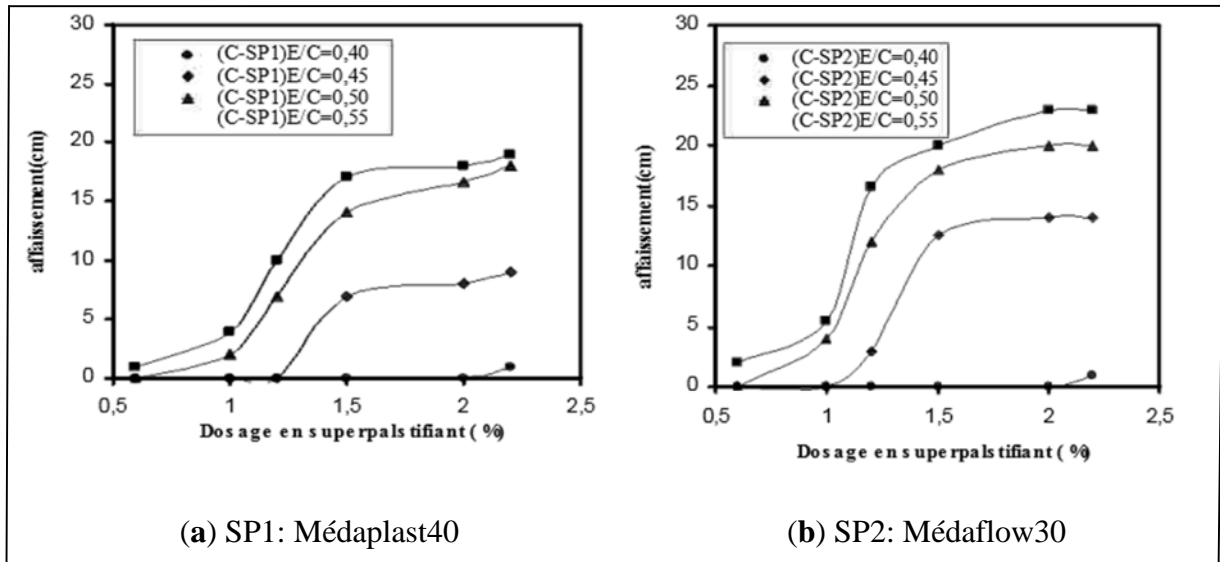
**Figure I.14.** Effet de la pouzzolane sur la résistance à la compression (Mouli et Khelafi, 2008).

Les résultats donnés par cette courbe montrent l'évolution des résistances en compression durant les échéanciers de 3, 7, 28, 90 et 365 jours et prouvent encore une fois que l'incorporation de 20% de pouzzolane comme ajout cimentaire donne les plus grandes résistances par rapport au béton témoin après 7 jours jusqu'à 365 jours. L'ajout de 30% de pouzzolane développe des résistances acceptables, mais à partir de 90 jours et plus par rapport au béton témoin.

On remarque que les pourcentages de 40% et 50% de pouzzolane affichent les résistances les plus faibles pour tous les âges et donc doivent être évités.

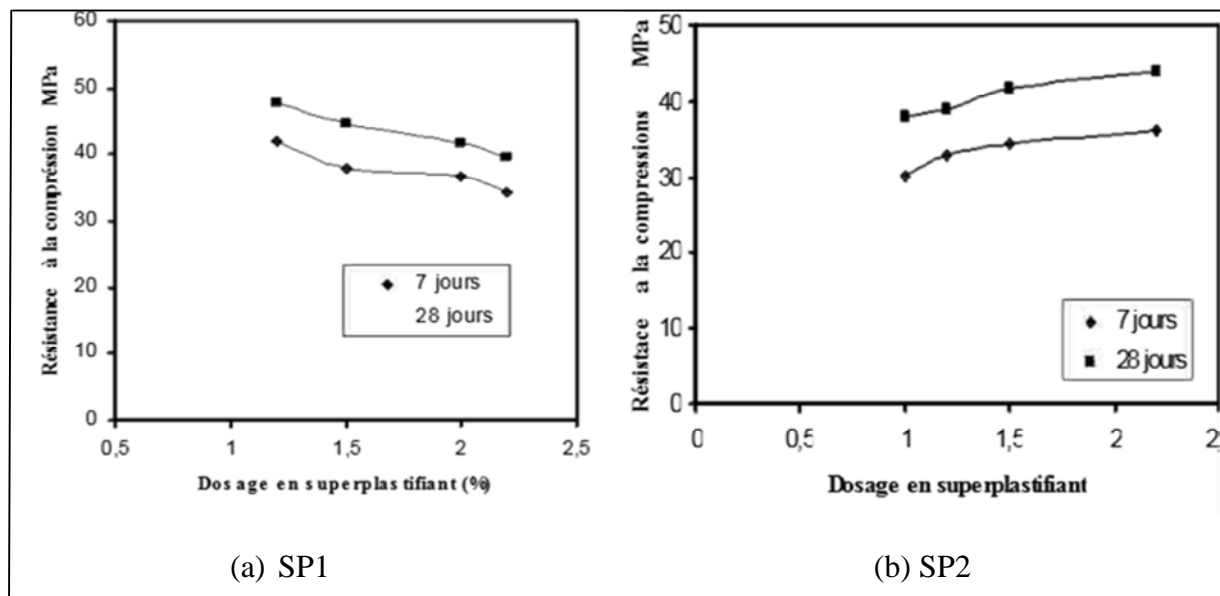
### I.6.6. Influence des adjuvants

L'incorporation d'un superplastifiant au béton a entraîné une modification de l'ouvrabilité, chacun selon son dosage et sa nature chimique. Les figures I.15 (a et b) présentent l'évolution de l'affaissement pour différents dosages en superplastifiants (SP1), (SP2) et différents rapports (E/C). Comme on pouvait s'y attendre, l'ouvrabilité augmente avec le dosage en eau et en superplastifiant.



**Figure I.15.** Effet du dosage en superplastifiant sur l'affaissement (Adjoudj et col, 2009).

La **figure I.16 (a) et (b)** montrent la variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant (SP1 et SP2) avec un rapport E/C égal 0.55.



**Figure I.16.** Variation de la résistance à la compression d'un béton adjuvanté par SP1 et SP2 (Adjoudj et col, 2009).

L'incorporation de SP1 au ciment composé à base de calcaire a provoqué une chute de résistance significative. Ce superplastifiant est incompatible avec ce type de ciment. Par contre, l'emploi du superplastifiant SP2 augmente considérablement la résistance à la compression, ce qui permet de justifier l'activité de ce produit à favoriser l'hydratation du ciment et à améliorer la microstructure.

## I.7. Bilan

Nous avons fait une revue générale sur le matériau béton, et l'influence des différents constituants sur ce dernier à l'état frais et à l'état durci. De nombreuses recherches ont été réalisées pour la mise au point de méthodes de formulation d'une part, et pour optimiser l'utilisation des constituants d'autre part, afin de trouver un compromis entre des propriétés parfois contradictoires, l'ouvrabilité et la résistance mécanique. En effet, l'ouvrabilité contrôle la mise en œuvre sur chantier tandis que la résistance mécanique conditionne la capacité portante de l'ouvrage.

A partir de cette recherche bibliographique, nous avons remarqué qu'il est nécessaire d'attacher une importance particulière à l'influence de chaque paramètre afin d'aboutir à une formulation optimale et d'atteindre au mieux les caractéristiques recherchées.

Le tableau ci-dessous récapitule les paramètres qui influent sur les caractéristiques du béton ordinaire.

Constituant	Affaissement	Viscosité	Résistance à 28j
Filler	↘	↗	↘
Pouzzolane	↘	↗	↘
Superplastifiant	↗	↘	↗
Granulat ( $D_{max}$ )	↘	↗	↘
E/C	↗	↘	↘
L'air occlus	↘	↗	↘



## Références bibliographiques

- **Adjoudj M., Ezziane K., Kadri EL.,** 2009 : Formulation et propriété d'un béton adjuvante par polycarboxylate, Laboratoire Géomatériaux, Université Hassiba Benbouali Chlef, Algérie.
- **ALEXANDER K.M., IVANUSEC I.,** 1982: Long term effects of cement SO3 content on the properties of normal and high-strength concrete, Part I. The effect on strength, Cement and Concrete Research, 12, N° 1.
- **AYAD M., BARKA Y.,** 2013 : MODÉLISATION DES BETONS ORDINAIRES PAR DES PLANS D'EXPERIENCES, Master à l'Université de Tlemcen, Algérie.
- **Belas Belarbi N., Semcha M., Laoufi L.,** 2003 : Influence de la pouzzolane de Beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons, Canadian Journal of Civil Engineering 30 no3 580-584.
- **Boudchicha A.,** 2007 : Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons, thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine, Algérie.
- **BOUKLI HACENE S. M. A.,** 2010 : Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen, thèse de Doctorat à l'Université de Tlemcen. Algérie.
- **DE LARRARD F.,** 2000 : Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTE A., Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris.
- **DREUX G., FESTA J.,** 1998 : Nouveau guide du béton et ses constituants, éditions Eyrolles, Paris.
- **DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J.C.,** 2000 : Granulats, sols, ciments et bétons, Edition Casteilla, Paris, 236 p.
- **El-BACHIR Yasmina.,** 2014 : Effet des différents adjuvants sur la performance du béton, Master professionnel à l'Université de Mohamed boudiaf, Oran, Algérie
- **El Barrak M.,** 2005 : Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais, Thèse de doctorat, l'université Toulouse III – Paul Sabatier, France.
- **GABRYSIA. F.,** 2007: Matériaux, Chapitre 4 bétons.

- **GOUFI N., KAID N., ABIDELAH A., AYED K., KERDAL D., 2011 : EFFET DE LA POUZZOLANE DE BENI SAF SUR LA DURABILITE DES BETONS »** séminaire sur les technologies du béton, USTMB Oran. Algérie.
- **KHELIFA M.R., 2009 :** Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants, thèse de doctorat de l'université d'Orléans, Constantine. Algérie.
- **Meftah H., Arabi N., 2012 :** L'effet du rapport E/C sur le comportement des bétons à hautes températures, laboratoire Génie Civil, université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
- **Mouli M., Khelafi H., 2008:** Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan, *Building and Environment*, vol 43, pp 31–36.
- **NEVILLE A.M., 2000 :** Propriétés des bétons, ed. CRIB., Paris, Eyrolles.
- **OLLIVIER J.P., BUIL M., 1992 :** La durabilité des bétons, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Eds., Paris.
- **RAKOTONIAINA V., 2006 :** CONTRIBUTION A L'ETUDE DU BETON DE SABLE – APPLICATIONS, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO.
- **Tabet N., 2012 :** Contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico- mécanique des bétons autoplaçants fibres (BAPF), Mémoire de magister, l'université M'hamed bougra-Boumerdes, Algérie.

---

# **CHAPITRE II**

## **Béton autoplaçant**

---

## II.1. Introduction

Les BAP ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon et plus particulièrement par le professeur Okamura.

Leur objectif était d'augmenter la cadence de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieur pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème (TURCRY, 2004).

C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autoplaçant considérés comme un matériau très fluide, homogène et stable, qui se met en place dans des coffrages très ferrailleur ou complexes, grâce au seul effet de son propre poids et sans l'utilisation de moyen de vibration.

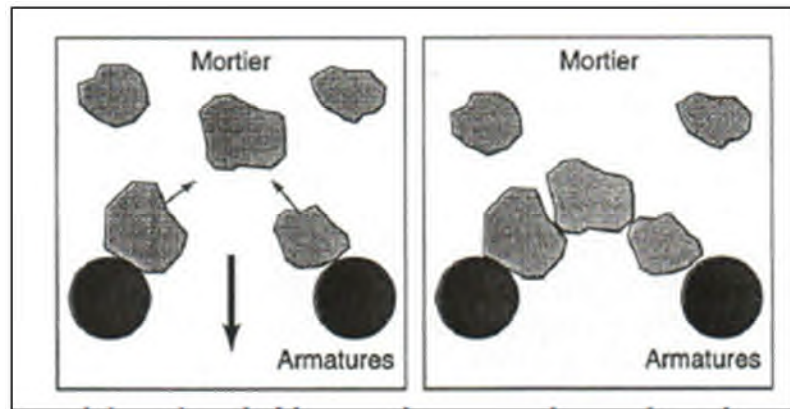
Il existe diverses appellations des BAP ("self-compacting concrete", traduit par béton Autoplaçant ou béton autonivellant), La première emploie le terme "béton autoplaçant", ou BAP, pour désigner les bétons destinés aux applications verticales et éléments massifs (voiles, poutres, piles, etc.). La seconde désigne sous l'appellation "béton autonivellant", ou BAN, les bétons destinés aux applications horizontales (dalles). On peut aussi trouver sous le nom de béton auto compactant.

Les BAP se développent aujourd'hui un peu partout dans le monde, et plus particulièrement en Europe, son utilisation se développe dans le domaine de la préfabrication et dans celui du béton près à l'emploi (B.P.E). En Algérie, ce type de béton présente un intérêt certain puisque les impératifs d'une meilleure qualité des ouvrages et aussi la complexité des coffrages commencent à se sentir de plus en plus ces dernières années.

## II.2. Particularités de la composition des BAP

- Un volume de pâte (ciment + additions + adjuvants + eau efficace + air) **élevé** environ de 330 à 400 L/m<sup>3</sup>, Pour limiter les frottements entre les granulats (écartement des granulats les uns des autres).
- Les BAP contiennent une quantité de fines (ciments, fillers calcaires) **élevée** de l'ordre de 500 kg/m<sup>3</sup> supérieure à celle des bétons conventionnels. Pour leur assurer une maniabilité suffisante, tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage.
- La présence de gravillons à faible volume permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations

conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP. Un faible volume de gravillons permet d'éviter le blocage du béton dans les zones confinées (**Figure II.1**). Pour cela et selon (**AFGC, 2008**) le diamètre maximal  $D_{max}$  des gravillons dans un BAP est compris entre 10 et 20 mm. Le choix d'un  $D_{max}$  plus important est donc possible mais ne se justifie que lorsque le confinement est faible.



**Figure II.1. Phénomène de blocage d'un granulat au droit d'un obstacle (Khalifa, 2009).**

- un rapport E/C faible et un dosage en eau limité.
- L'utilisation des superplastifiants permet d'augmenter la fluidité. Toutefois un dosage trop élevé peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

### **II.3. Les avantages du béton autoplaçant**

Un BAP est donc un béton qui présente des caractéristiques rhéologiques telles qu'il se met en place sous son propre poids, en restant homogène, sans aucune vibration. Les avantages d'un tel béton sont les suivants :

✓ **pour la mise en œuvre :**

- diminution du temps de coulée.
- meilleures conditions de travail, ce qui permet d'attirer une main d'œuvre qui n'appréciait pas toujours les conditions de travail « bruyantes ».
- possibilité de couler des bétons dans des endroits inaccessibles.
- possibilité de couler des voiles de grande hauteur en une seule opération.

✓ **sur la qualité du béton :**

- parfait remplissage des éléments fortement ferrailés.
- obtention d'une bonne qualité de parement (surface de béton lisse et donc moins de pores en surface).

- et d'une manière générale, obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation ; cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

✓ **concernant la conception :**

- permet d'envisager de nouveaux types d'éléments en béton.
- possibilité d'intégrer des réservations dans le coffrage.

## **II.4. Caractérisation des BAP à l'état frais**

Le béton autoplaçant réalisé doit être soumis aux 3 essais (essai d'étalement au cône d'Abrams, essai de l'écoulement à la boîte en L et essai de la stabilité au tamis) de laboratoire et valider les exigences du cahier des charges sur chantier. C'est-à-dire les trois essais de laboratoire, **doivent être testés en centrale de chantier** avant d'être mises en place pour la construction.

La formule de béton autoplaçant qui valide tous les essais, autant en laboratoire que sur chantier, doit aussi avoir une **résistance à la compression supérieure à celle** demandée dans le cahier des charges. C'est seulement après avoir validé toutes ces étapes le BAP peut être mis en place. C'est donc pour toutes ces raisons que le béton autoplaçant est dur à mettre en place (DENIS, 2007 et CUSSIGH, 2007).

### **II.4.1. Présentation des essais de caractérisation des BAP à l'état frais**

Trois essais de caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais ont été recommandés par L'Association Française de Génie Civil « AFGC » en juin 2000, Initialement provisoires, ces recommandations sont devenues par la suite des essais de référence pour valider une formule de BAP.

L'ouvrabilité des bétons autoplaçants se décompose en trois caractéristiques :

- La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement) ;
- La mobilité en milieu confiné (décrit par la boîte en L) ;
- La stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

#### **II.4.1.1. L'essai d'étalement au cône d'Abrams**

L'essai d'étalement s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser, il permet de mesurer la fluidité, la viscosité et le risque de ségrégation du béton.

Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (**Figure II.2**) Cependant l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen

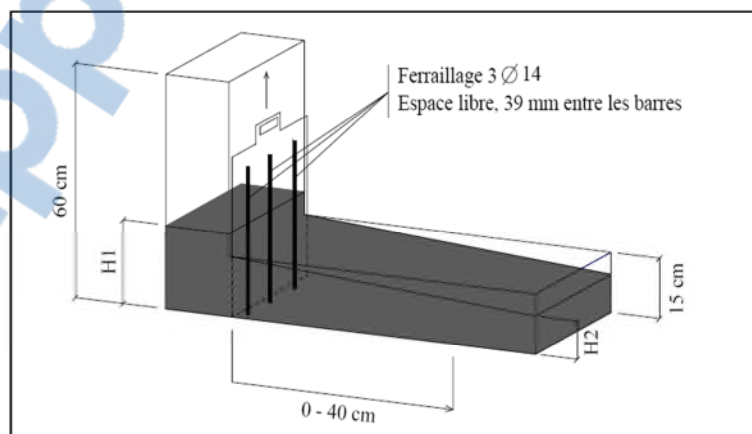
(moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. En général, des valeurs élevées de  $T_{500}$  traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Une observation permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai réalisable sur chantier ne nécessite qu'un petit échantillon de béton. Une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir un BAP.



**Figure II.2.**Schéma du cône d'Abrams pour la détermination de l'étalement (Khelifa, 2009).

#### II.4.1.2. L'essai d'écoulement à la boîte en L (L-Box)

Cet essai est réalisé en utilisant une boîte ayant une forme en L, pour vérifier que le béton a la capacité de traverser les armateurs d'un coffrage sans vibration, et permet de mesurer le taux de remplissage et le temps d'écoulement (Voir **figure II.3**).



**Figure II.3.**Mesure du taux de remplissage (Taleb, 2009).

La procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante : la partie verticale de la boîte est remplie de béton, le volet est soulevé après une minute, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, formé de trois barres d'armatures de diamètre 14 mm et distantes de 39 mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (H1 et H2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage  $H2/H1$  qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné. Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP.

#### II.4.1.3. L'essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (**voir figure II.4**).



**Figure II.4.** Essai de stabilité au tamis (CUSSIGH, 2007).

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

Il consiste à déposer 4.8 kg de béton sur un tamis de maille 5 mm. Après deux minutes de tamisage, on pèse la quantité de mortier (laitance) ayant traversé le tamis. Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation.



Selon l'Association Française de Génie Civil « AFGC » en juin 2000, Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes :

- $0\% \leq \% \text{ laitance} \leq 15\%$  : stabilité satisfaisante ;
- $15\% < \% \text{ laitance} \leq 30\%$  : stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ ;
- $\% \text{ laitance} > 30\%$  : stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.

#### II.4.1.4. L'essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel »

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante: l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la (figure II.5), est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autocompactant.

Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps D'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton BAP.

Selon BOUZOUBAA et al ; (cité par BENSEBTI, 2008), Cet essai est utilisé aussi pour évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement. Moins le béton est stable, plus l'écoulement est perturbé par les collisions inter-granulaires et plus la durée de l'écoulement est longue.

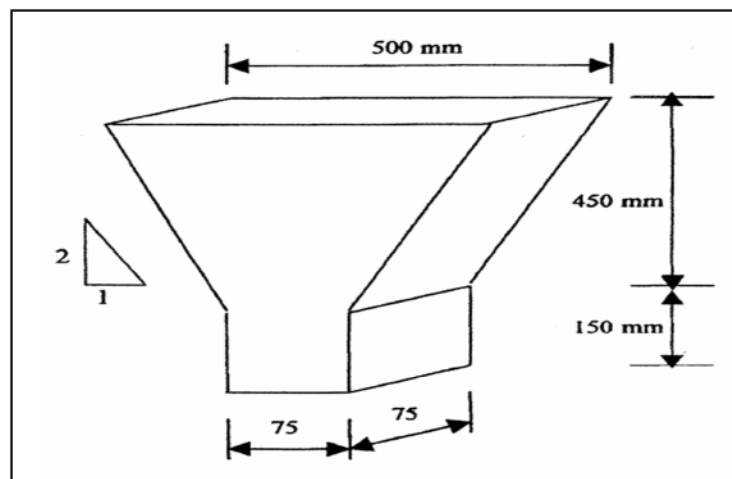


Figure II.5. Essai de l'entonnoir en forme de « V » (BENSEBTI, 2008).

## II.5. Caractérisation des BAP à l'état durci

Comme énoncé précédemment, les BAP diffèrent essentiellement des bétons ordinaires vibrés par leurs propriétés à l'état frais. À l'état durci, leurs propriétés sont très voisines et dépendent directement du détail de la formulation.

### II.5.1. Propriétés mécaniques

**Taleb (2009)** a montré que la résistance en compression à 28 jours dépend essentiellement de la résistance du ciment, du rapport E/C équivalent, du degré d'hydratation et du dosage de l'adjuvant. Les BAP peuvent couvrir une large gamme de performances mécanique (de 30 à 60 MPa ne pose pas de problèmes). Il est d'ailleurs difficile d'obtenir des résistances faibles, à cause de la richesse de BAP en éléments fins du mélange et de la limitation du dosage en eau. La principale différence à l'état durci est la plus faible proportion volumique de gravillons ce qui produit une légère augmentation des propriétés de déformation instantanées et différées du béton Autoplaçant (module d'élasticité plus faible, retrait et fluage plus forts).

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont des éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm. Une fois démoulées, elles subissent une rectification et sont conservées dans l'eau jusqu'à l'échéance déterminée (2, 7, 28 et 90 jours).

## II.6. Classification des BAP

### II.6.1. Classes d'étalement (Essai d'Étalement)

La norme NF EN 206-9 définit 3 classes de consistance, l'étalement est mesuré à l'aide du cône d'Abrams (Slump test).

**Tableau II.1.** Les classes d'étalement selon la norme **NF EN 206-1**.

CLASSE	ETALEMENT en mm
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

### II.6.2. Classes d'aptitude à l'écoulement (Essai de LBOX)

Il existe 2 classes d'aptitude à l'écoulement.

**Tableau II.2.**Les classes d'aptitude à l'écoulement selon la norme **NF EN 206-1**.

CLASSE	TAUX DE REMPLISSAGE
PL1	$\geq 0,80$ avec 2 armatures
PL2	$\geq 0,80$ avec 3 armatures

### II.6.3. Classes de résistance à la ségrégation (Essai de stabilité au tamis)

**Tableau II.3.**Les classes de résistance à la ségrégation selon la norme **NF EN 206-1**.

CLASSE	POURCENTAGE DE LAITANCE
SR1	$\leq 20$
SR2	$\leq 15$

Il existe d'autres classes de consistance

- classe de viscosité apparente : t500 – entonnoir en V

**Tableau II.4.**Les classes de viscosité selon la norme **NF EN 12350-9**.

CLASSE	Temps (s) relatif à l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V
	(Valeur limites applicables aux charges individuelles)
VF1	$< 9,0$
VF2	9,0 à 25,0

## II.7. Les méthodes de formulation

On a plusieurs méthodes de formulation telle que : approche japonaise, la méthode de minimisation du volume de la pâte, la méthode d'optimisation du squelette granulaire/approche LCPC, la théorie de la pâte en excès, la méthode chinoise, méthode basée sur un plan d'expérience etc.

Parmi les méthodes de formulation les plus répandues, nous citons :

- La méthode basée sur l'optimisation des mortiers ;
- La méthode chinoise ;
- La méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires.

La méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires, réside dans la nécessité d'acquérir le logiciel (Betonlab Pro), ce qui présente un inconvénient majeur dans certains laboratoires.

Les bétons autoplaçants obtenus par la méthode basée sur l'optimisation du mortier sont loin d'être économique car ils comportent un volume de pâte très important et peuvent conduire à des problèmes de retrait.

En parallèle, la méthode chinoise utilise une relation empirique pour estimer le dosage en ciment fondée sur des données empiriques provenant du Taïwan. Elle ne peut pas donc être appliquée dans d'autres régions.

### **II.7.1. Méthode basée sur l'optimisation du mortier**

Cette méthode est également nommée Méthode Japonaise, proposée initialement par des chercheurs Japonais : Okamura et Ozawa ainsi que Ouchi (**OKAMURA et OZAWA, 1995**) et (**OKAMURA et OUCHI, 2003**) de l'université de Tokyo. Elle permet l'obtention de formulations fortement dosées en ciment et conduit à des volumes de pâtes importants. Les bétons obtenus par cette méthode sont sous dosés en granulats, sur dosés en liant et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

#### **II.7.1.1. Dosage des gravillons**

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m<sup>3</sup> de béton est limité à la moitié de sa compacité.

Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage et le volume du gravier est donc fixé à 50% du volume des solides contenus dans le béton.

#### **II.7.1.2. Dosage du sable**

Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

#### **II.7.1.3. Dosage du liant**

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de

ciment de  $350 \text{ kg/m}^3$ ). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

#### **II.7.2.4. Dosage de l'eau et du superplastifiant**

Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir

### **II.7.2. Méthode de formulation chinoise**

Dans les pays européens, la méthode japonaise a été adoptée et employée comme un point de départ pour le développement des BAP.

Plus récemment, **Su et col. (2001, 2003)** ont développé une méthode alternative pour la composition du BAP, dénommée « méthode chinoise ». Basé au début, sur la détermination d'un facteur de compacité « **PF** » du mélange des agrégats (sable et gravier) pour optimiser le squelette granulaire et puis, sur le remplissage des vides des granulats avec la pâte. Cette méthode est plus facile pour l'exécution et préserve le coût.

Le volume de la pâte est optimisé de façon à satisfaire les exigences de résistance et de durabilité. (**JSCE, 1998**) utilise un dosage en ciment entre  $270$  et  $290 \text{ Kg/m}^3$ . Le dosage en superplastifiant est vérifié expérimentalement à l'échelle du béton pour assurer l'ouvrabilité requise.

Selon cette méthode, la formulation du BAP passe par les étapes suivantes :

#### **II.7.2.1. Calcul du dosage des granulats**

Le facteur de compacité **PF** « **Packing Factor** » des granulats est défini comme un rapport entre la masse volumique apparente de l'empilement granulaire compacté (bien remplis dans BAP) par vibration et la masse volumique du squelette à l'état empilé sans compactage (moins rempli).

Le paramètre « **PF** » influe sur la teneur des granulats dans le BAP. Une valeur plus élevée du « **Packing Factor** » est signe d'une plus grande quantité de gros et de fins granulats utilisés, ce qui impliquera une diminution de la teneur en liant dans le BAP. Par conséquent, la capacité de passage du béton autoplaçant et sa résistance à la compression seront réduites.

La proportion de gros granulats (gravier) et de fins granulats (sable) peut être calculée respectivement par les deux équations suivantes :

$$Mg = PF. \rho g. \left(1 - \frac{S}{S + G}\right) \quad (\text{II. 1})$$

$$Ms = PF. \rho s. \left(\frac{S}{S + G}\right) \quad (\text{II. 2})$$

Avec

Mg : Proportion de gros granulats ( $\text{Kg/m}^3$ ).

Ms: Proportion du sable ( $\text{Kg/m}^3$ ).

$\rho g$ : Masse volumique apparente des gros granulats ( $\text{Kg/m}^3$ ).

$\rho s$  : Masse volumique apparente du sable ( $\text{Kg/m}^3$ ).

$\left(\frac{S}{S+G}\right)$  : Rapport volume du sable sur le volume total des granulats.

Une faible valeur de « PF » aura pour conséquence des risques d'un retrait de séchage important du béton (**Su et col, 2001**). Donc il est très important de connaître la valeur optimale de « PF » pour répondre aux exigences des propriétés des BAP, et au même temps de prendre en considération le côté économique.

La détermination du « PF » pourra être effectuée sur la base d'essai de compacité sur le sable et le gravier séparément ou directement sur des combinaisons de matériaux. Les résultats sont par la suite traités par le logiciel RENE LCPC (**El Hilali, 2009**). Les compacités des matériaux sont déterminées par la méthode de vibration avec compression.

#### **a. compacité du sable :**

La compacité du sable est déterminée sur un échantillon de 3kg dans une éprouvette 16×32 cm solidarisé à une table vibrante. Une pression de 10kPa (masse de 20 kg) a été appliquée avec 150Hz pour des vibrations de 1min.

Deux modes de compactage ont été utilisés: avec et sans vibration. Les compacités peuvent être calculées comme l'indique l'équation suivante:

$$Cs = \frac{3}{\rho s \times V} \quad (\text{II. 3})$$

Avec

$\rho s$  : La masse volumique du sable ( $\text{Kg/m}^3$ ).

V : Le volume final ( $\text{m}^3$ ).

### **b. compacité du gravier :**

La compacité du gravier est obtenue de la même manière que celle du sable, mais sur un échantillon de 7,5 kg, elle peut être calculée par l'équation suivante:

$$C_g = \frac{7.5}{\rho_g \times V} \quad (\text{II. 4})$$

Avec

$\rho_g$  : La masse volumique du gravier ( $\text{Kg/m}^3$ ).

$V$  : Le volume final ( $\text{m}^3$ ).

#### **II.7.2.2. Calcul du dosage de ciment**

(JSCE, 1998) utilise un dosage en ciment entre 270 et 290  $\text{Kg/m}^3$ . Les recommandations en Tawain imposent pour le BHP ou le BAP une résistance à la compression pour 1 kg de ciment égale à 20 psi (0,14 MPa).

Donc, Le dosage en ciment est déterminé à partir la formule empirique suivent :

$$C = \frac{\sigma'_c}{20} \quad (\text{II. 5})$$

$C$  : Dosage en ciment ( $\text{Kg/m}^3$ ).

$\sigma'_c$  : Résistance à la compression considérée en psi.

Ou également:

$$C = \frac{\sigma'_c}{0.14} \quad (\text{II. 6})$$

Dans ce cas  $\sigma'_c$  est considérée en MPa (1 bar =14.51 psi=1.013×10<sup>5</sup> Pa).

#### **II.7.2.3. Calcul du dosage en eau**

Le calcul de la quantité d'eau est basé sur la connaissance du rapport  $\frac{E}{C}$  déterminé expérimentalement à travers des essais de compression et généralement estimé à  $\frac{E}{C} = 0.43$ , de la demande d'eau des additions fines et du dosage en superplastifiant estimé selon les données de la littérature (El Hilali, 2009).

### **II.7.3. Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires/approche LCPC**

Méthode française développée au LCPC: proposée par (**De Larrard et al, 1994**) : et repose sur les principes du Modèle d'Empilement Compressible, MEC, du squelette granulaire (**SED et LAR 1999**). Elle permet d'estimer la compacité réelle de l'empilement granulaire à partir des caractéristiques de l'ensemble des grains qui le composent (forme, granulométrie).

Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc..) et qui permet d'optimiser la composition du BAP à partir d'un cahier des charges précis.

L'utilisation de cette méthode nécessite la réalisation de certains essais expérimentaux pour déterminer la compacité du sable, la compacité des gravillons, la demande en eau du ciment avec superplastifiant, la demande en eau des fillers avec superplastifiant et le dosage à saturation du superplastifiant pour le ciment.

### **II.8. Normalisation du béton autoplaçant (la norme NF EN 206-9)**

Selon **Belaidi et Brixi (2014)**, cette norme complète la norme NF EN 206-1 et donne les règles qui s'appliquent au béton autoplaçant (BAP). Les règles communes ne sont pas reprises dans cette norme. Outre les exigences définies dans la norme NF EN 206-1, cette norme européenne définit des exigences relatives :

- aux constituants du BAP ;
- aux propriétés du BAP frais et durci et à leur vérification ;
- aux limitations applicables à la composition du BAP ;
- à la spécification du BAP ;
- aux procédures de contrôle de la production en usine ;
- aux critères de conformité.

### **II.9. Les paramètres influents sur les propriétés des BAP**

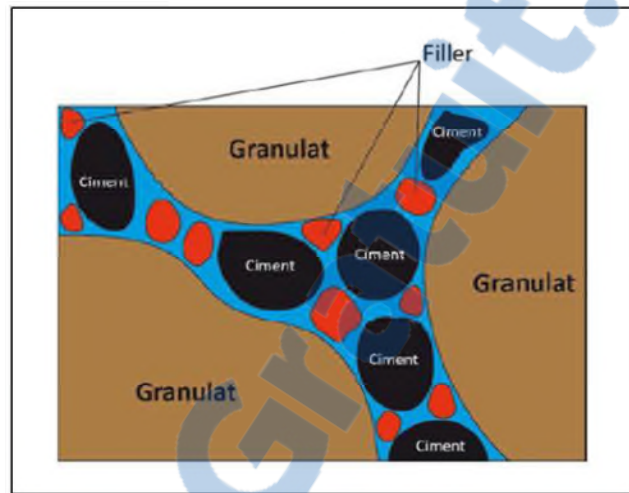
#### **II.9.1. Influence des fillers calcaires sur les propriétés des BAP à l'état frais**

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage des roches calcaires, ils conformes à la norme NF P18-508, sont du type I selon la norme EN 206-1.



**La Figure II.6** montre que les fillers calcaires permettent de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). Par conséquent une quantité de l'eau qui occupait ces vides est libérée dans la solution interstitielle, ce qui se traduit par une meilleure fluidité.

L'effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés du béton aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.



**Figure II.6.** Illustration de l'effet filler (Diederich, 2010).

**Neto et Campitelli (rapporté par M. NEHDI, 2000)** utilisent un test pour caractériser la rhéologie de la pâte de ciment qui contient du filler calcaire. Ils observent la réduction du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la teneur en filler calcaire, et aussi l'augmentation de la viscosité plastique au-delà d'une certaine valeur de la finesse du calcaire.

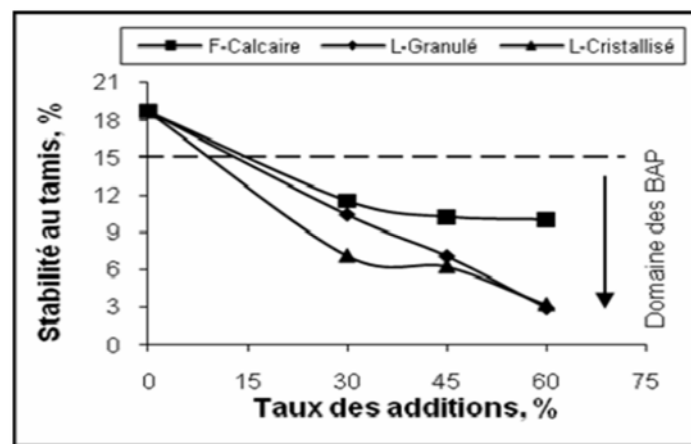
**Brookbans (cité par NEHDI, 2000)**, a étudié l'effet de l'addition de 5 à 28% de poudre calcaire au ciment sur les propriétés du béton frais. Il a observé que le temps de prise est réduit quand on augmente le taux de fillers et que ces derniers réduisent beaucoup la quantité d'eau et probablement n'ont pas un effet d'entraîneur d'air.

Du fait de sa grande utilisation dans l'industrie, de nombreuses études ont montré généralement le rôle important des fillers dans les bétons, les mortiers, en soulignant que leur présence excessive était souvent un facteur néfaste. Toutefois, ces études ont été réalisées le plus souvent sur des mortiers normaux dans lesquels une partie du sable ou du ciment a été substituée par des fillers calcaires (**Benachour et col, 2008**).

Selon **El Barrak (2005)** les fillers calcaires ont une bonne affinité avec la matrice cimentaire. Par ailleurs ils confèrent au béton frais un pouvoir de conservation d'eau qui permet de limiter la ségrégation et le ressuage « **Ressuage** : remontée éventuelle d'eau à la surface d'un mortier ou d'un béton avant prise, cette remontée d'eau est liée au tassement sous l'effet de leur poids, des éléments solides (ciment et granulats) qui composent le matériau ».

Selon le même auteur (**El Barrak ,2005**), plusieurs auteurs ont remarqué que, pour un dosage constant en ciment (ou un rapport E/C constant), l'ajout du filler calcaire contribue à diminuer la viscosité d'une pâte de ciment (malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides), avant de provoquer une augmentation de la viscosité lorsque son dosage dépasse une certaine valeur critique, qui dépend du rapport E/C.

Les résultats obtenus par **Felekoglu (2007)** ont montré que les fillers calcaires augmentent la viscosité des pâtes de ciment, en améliorant la stabilité et la non-ségrégation, pour un dosage en superplastifiant et un rapport eau/ (ciment+fillers) constant.

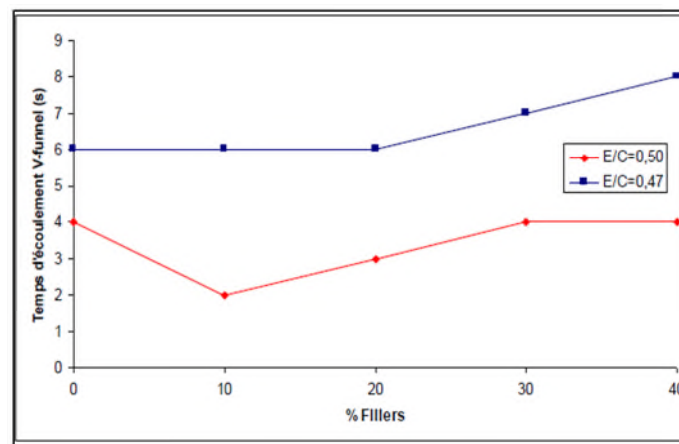


**Figure II.7.**Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis (**Boucetta et col, 2011**).

Le même auteur **Felekoglu (2008)** a fait une étude comparative entre un sable riche et un sable pauvre en fines dans les bétons autoplaçants. Un sable naturel lavé, un sable calcaire concassé lavé et deux autres sables calcaires contenant différents taux de fines ont été utilisés pour déterminer les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Il a été observé que les fines calcaires du sable concassé augmentent la déformabilité de la pâte fraîche et la viscosité plastique des BAP. Comparé aux BAP formulés avec des sables lavés, la stabilité et la déformabilité sont améliorées avec l'utilisation des sables concassés riches en fines. Ces BAP présentent alors des meilleures performances à l'état frais sans diminution de la résistance à la compression à l'état durci.

**Yahia et col. (2005)** ont montré que chaque rapport E/C correspond à un dosage optimum en filler calcaire qui peut assurer un écoulement optimal du mélange cimentaire. Au-delà de ce seuil, les frictions entre particules sont de plus en plus importantes et donc la viscosité sera plus élevée.

D'un autre côté **Taleb (2009)** a constaté que le besoin en eau est plus important lorsqu'il s'agit d'utiliser des fines minérales en substitution d'une partie de ciment et d'après les résultats obtenus il a souligné que les fillers calcaires diminuent la viscosité du béton jusqu'à un certain taux de substitution, au-delà duquel les frictions entre les particules deviennent plus importantes et augmentent, engendrant une augmentation de la viscosité (**figure II.8**).

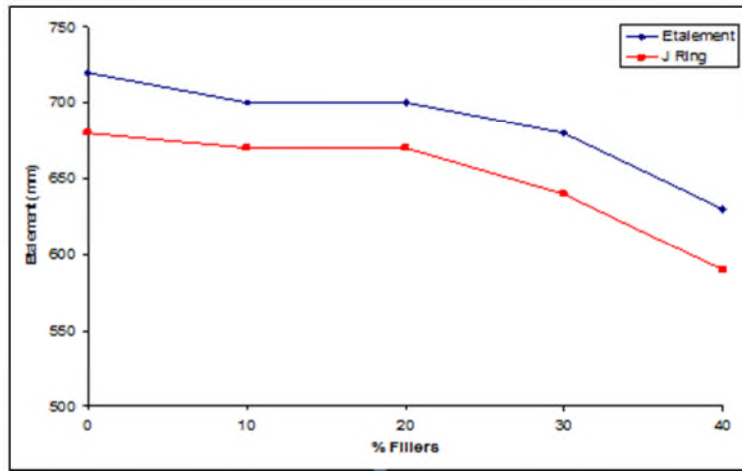


**Figure II.8.** Temps d'écoulement au V-funnel en fonction du pourcentage de fillers calcaires (**Taleb, 2009**).

**El Hilali (2009)** a montré que l'ajout de fillers calcaires de surface spécifique élevée améliore la fluidité des BAP, particulièrement en milieu confiné. Les fillers augmentent la compacité du mélange, améliorent la résistance à la ségrégation et la robustesse de la formulation. De même, il apparaît que la finesse des fillers influe significativement sur la demande en superplastifiant (SP).

(**Ghezal et Khayat, 2002 cité par Taleb, 2009**) ont souligné que l'effet des fillers dépend du dosage en ciment. A ce titre, ils ont remarqué que l'augmentation du dosage en fillers pour un béton dosé à  $360 \text{ kg/m}^3$  de ciment permet de réduire la demande en superplastifiant pour une fluidité constante. Ils ont aussi trouvé des résultats inverses avec un dosage en ciment de  $290 \text{ kg/m}^3$ . Les mêmes auteurs ont souligné que l'augmentation du dosage en fillers de calcaires aboutit à une diminution de l'étalement et donc de la fluidité (**Figure II.9**).

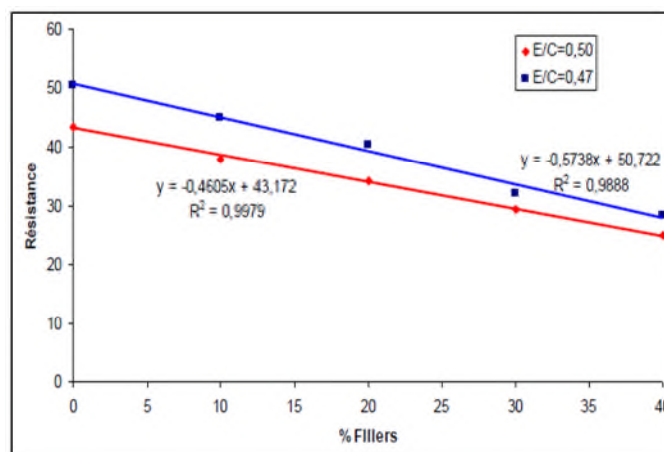




**Figure II.9.** Etalement des BAP en fonction du pourcentage de fillers ( $E/L = 0,50$ ) (Taleb, 2009).

### II.9.2. Influence des fillers calcaires sur les propriétés des BAP à l'état durci

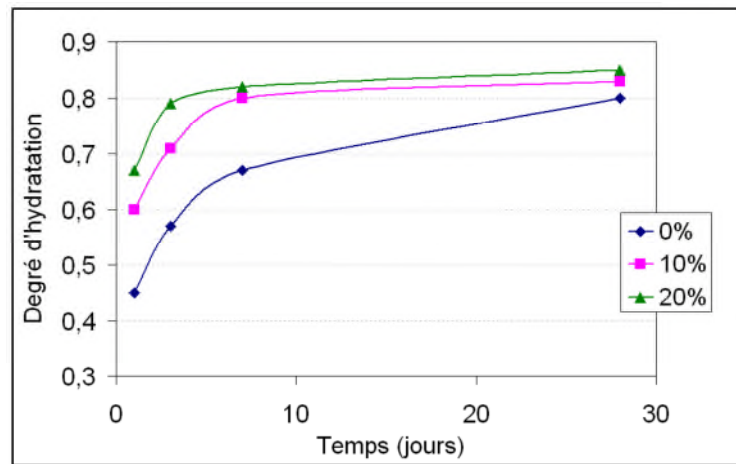
À l'état durci **Felekoglu (2007)** montre que l'utilisation de filler permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pâte, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un certain taux de substitution. Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution (**figure II.10**). Une augmentation de la finesse du filler permet d'améliorer les résistances des mélanges cimentaires sur mortier.



**Figure II.10.** Résistance à la compression à 28 jours en fonction du pourcentage de fillers (Taleb, 2009).

Les fillers calcaires accélèrent le degré d'hydratation du ciment (**Figure II.11**) et de ce fait l'action positive du filler sur les résistances est essentiellement marquée pour les résistances

au jeune âge (entre 1 et 7 jours) (Escadeillas, 1988 cité par **Diederich, 2010**), et a tendance à être négligeable au long terme (Zhu, 2004 et Voglis, 2005 cité par **Die3derich, 2010**).



**Figure II.11.**Évolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en filler (0, 10, 20%)  
(**Diederich, 2010**).

### II.9.3. Influence de La pouzzolane sur les propriétés des BAP à l'état frais

La pouzzolane est un matériau **naturel** (produit d'origine volcanique) ou **artificielle** (traitement thermique pour assurer des propriétés pouzzolaniques), composé essentiellement de silice, d'alumine, d'oxyde de fer. Elles sont assez largement utilisées en Génie Civil à cause de leur faible coût et de leurs propriétés physico-chimiques.

Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques, à la durabilité.

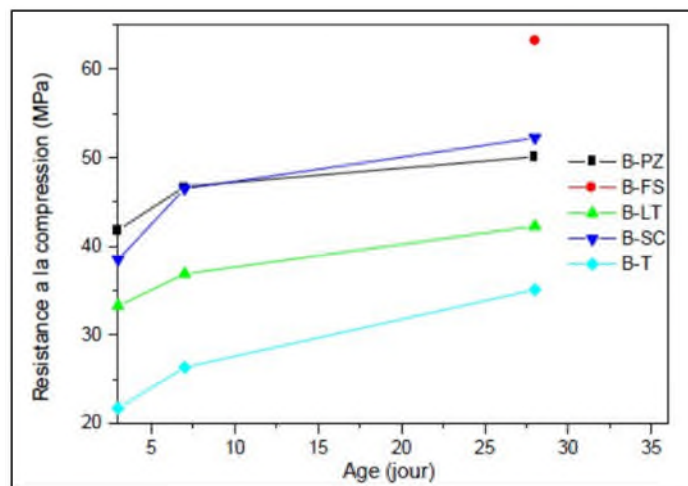
En Algérie la pouzzolane est beaucoup employée et commercialisée à côté des cimenteries qui l'utilise comme ajout actif à des taux de 15% à 20% dans la fabrication des ciments composées (CEM II), mais elle peut aussi être directement incorporées lors de la fabrication des bétons.

Pour l'effet de la pouzzolane naturelle sur l'écoulement des matériaux cimentaire, (**Krachai et col, 2009**) ont effectué des essais de caractérisation des différents BAP à l'état frais (BAP avec 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% et 35% de pouzzolane naturelle de BENI SAF), les résultats trouvés montrent que la pouzzolane naturelle réduit les propriétés d'ouvrabilité des BAP.

Les pouzzolanes améliorent la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation.

#### II.9.4. Influence de La pouzzolane sur les propriétés des BAP à l'état durci

L'étude faite par **Aissa et col, (2005)** a mis en évidence l'influence de l'ajout cimentaire de la pouzzolane dans le béton qui a montré une assez bonne résistance à la compression par rapport au béton avec ajouts (B-FS, B-LT, B-SC) et le béton sans ajouts. Les courbes de la **figure II.12** montrent l'évolution de la résistance à la compression du béton aux différents âges de durcissement avec les divers ajouts et le béton témoin. On constate que le béton témoin présente la plus basse valeur de la résistance à la compression et que le béton à la fumée de silice possède la plus grande valeur de la résistance à la compression à long terme, cela est vrai aussi, pour le béton à la pouzzolane et qui prouve que l'activité pouzzolanique joue un rôle important dans l'augmentation des résistances.

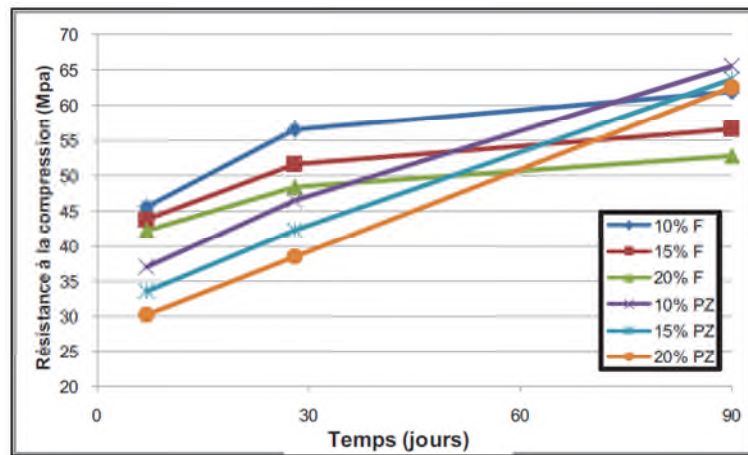


**Figure II.12.** Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps (**Aissa et col, 2005**).

**Moukhtari (2006)** a montré que la pouzzolane permet l'obtention d'un ciment composé de qualité et de performance aussi appréciables qu'un ciment Portland sans ajouts et de classe de résistance équivalente à celui-ci. De plus, un ciment composé de pouzzolane, confère aux bétons une meilleure résistance aux agressions chimiques, en plus de leur durabilité grâce au remplissage des pores par les particules fines de la pouzzolane.

**Bellifa (2012)** a montré que, à 7 et 28 jours, les pâtes confectionnées à base de fillers calcaires ont donné des résistances à la compression plus élevées par rapport aux pâtes contenant de la pouzzolane naturelle. Ceci est dû à la cinétique lente des réactions

d'hydratations de la pouzzolane naturelle à cet âge. Ce résultat s'explique aussi par l'action des fillers qui accélère l'hydratation du  $C_3S$  au jeune âge. A 90 jours, la tendance s'inverse. Nous constatons que la résistance à la compression des pâtes contenant de la pouzzolane naturelle est plus importante par rapport aux pâtes contenant des fillers calcaires. Ce résultat est dû au fait qu'à long terme, la réaction pouzzolanique continue son effet en formant un deuxième C-S-H supplémentaire, et augmente de cette manière avec le dosage de l'ajout pouzzolanique. Ce résultat rejoint ceux de **Siad (2010)**.



**Figure II.13.** Evolution des résistances à la compression des pâtes autoplçantes (**Bellifa, 2012**).

Selon (**Boudiaf, 2011**) les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- Accroissement de la résistance finale ;
- Légère diminution du retrait et du fluage ;
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité ;
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques ;
- Protection des armatures contre la corrosion ;
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques ;
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces Exposées du béton ;

- une réduction sensible de la fissuration.

### **II.9.5. Influence du superplastifiant sur les propriétés des BAP**

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à faibles proportions (0,5 à 2 % du poids de ciment) au béton frais, permettent de modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Ils sont des polymères à chaînes macro-moléculaires très longues qui permettent de défloculer les grains de ciment.

L'utilisation de superplastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation (**Tabet, 2012**).

Les superplastifiants sont généralement classés en quatre groupes :

- les polycondensats de formaldéhyde et de mélamine sulfonée (PMS).
- les polycondensats de formaldéhyde et naphtalène sulfonée (PNS).
- les lignosulfonates modifiés (MLS) et les autres incluant les esters d'acides sulfoniques, les polyacrylates et les polycarboxylates.

- **Polymélamine sulfonâtes(PMS)**

Le PMS est une polymélamine sulfonate effectué à partir de la mélamine, du forma Aldéhyde.

- **Polynaphtalène sulfonâtes(PNS)**

Le PNS est un polymère composé d'un aldéhyde et de naphtalène sulfoné, sont d'une efficacité dispersante très liée à la nature du ciment.

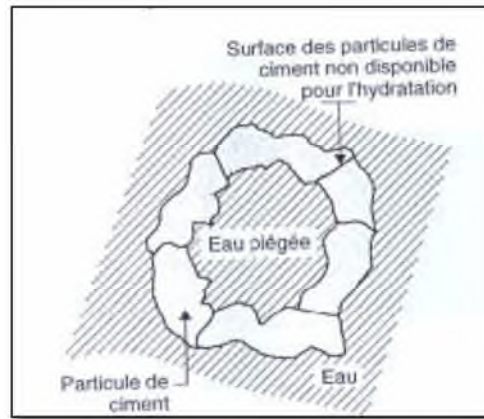
- **Polycarboxylate polyoxéthylène (PCP)**

Le **PCP** est un polymère dont le mécanisme de dispersion se fait par une répulsion combinée D'effets électrostatiques. Le groupement fonctionnel est formé d'acides métacryliques ou acryliques.

#### **II.9.5.1. Interactions superplastifiants – ciment**

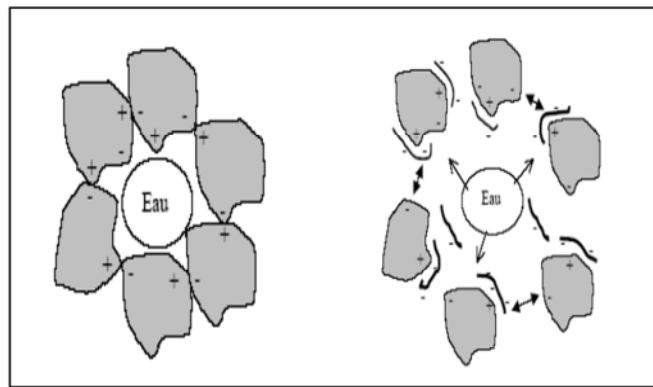
Les grains de la matrice cimentaire (ciment et additions) en contact avec l'eau ont tendance à s'agglomérer sous forme d'amas ayant une structure en château de carte, c'est la floculation. Ce phénomène est lié à la présence des charges électriques différentes sur la surface des grains. Les charges opposées vont s'attirer les unes aux autres, les particules vont floculer et augmenter la résistance à l'écoulement du mélange, qui tend à piéger un certain volume d'eau à l'intérieur des flocs et empêcher l'eau d'hydrater certaines parties des surfaces des grains de ciment qui se trouvent en quelques sortes soudés les unes aux autres (**Figure II.14**).





**Figure II.14.**Floc de ciment en l'absence de réducteur d'eau selon Rixom et Mailvaganam, 1986 (tiré de Taleb, 2009).

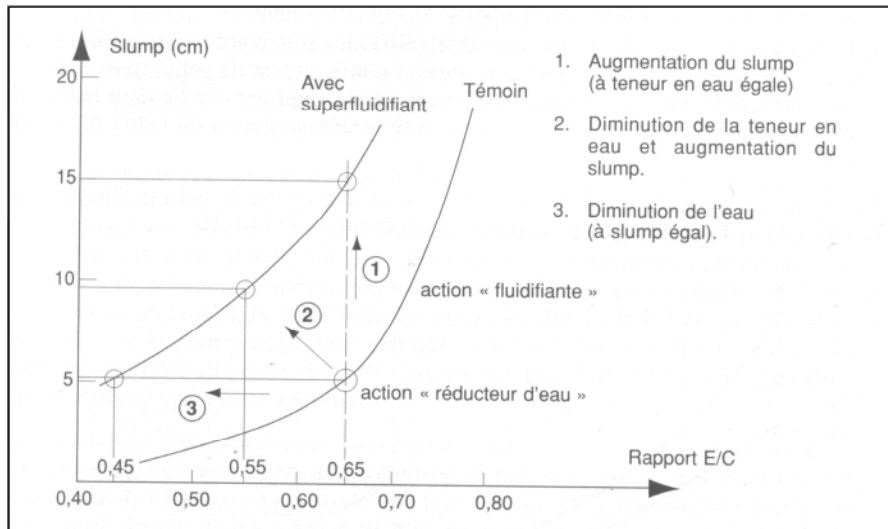
Dans ce cas, l'incorporation des superplastifiants augmente la surface des grains de ciment qui engendre l'hydratation initiale. Ceci permet de libérer une partie de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment floculés, et donne la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et la mise en place du béton, et par conséquent, augmenter la quantité d'eau disponible pour l'hydratation, ainsi que les caractéristiques mécaniques du béton tel que : la résistance à la ségrégation, durabilité.



**Figure II.15.**Action des superplastifiants–Défloculation des grains de ciment (FARES, 2009).

### II.9.5.2. Influence du superplastifiant sur les propriétés des BAP à l'état frais

En tant qu'adjuvant, le superplastifiant peut avoir plusieurs fonctions dans un mélange cimentaire. Permet de privilégier soit l'action « réduction d'eau » ou « l'effet fluidification » ou bien les deux, ensemble (Figure II.16).



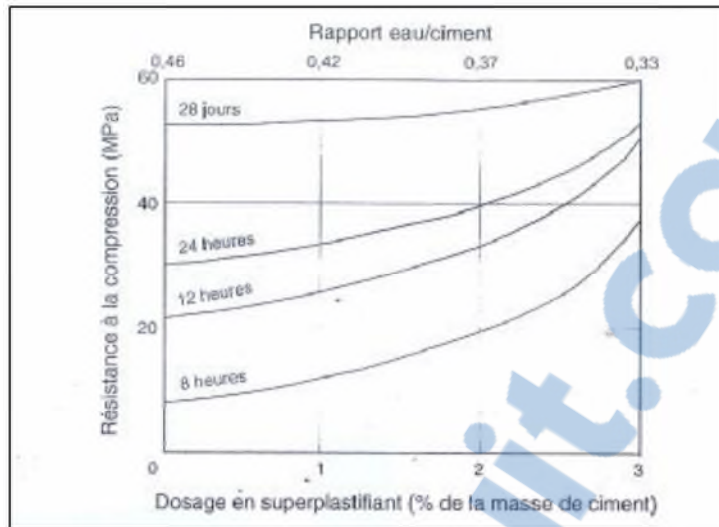
**Figure II.16.** Utilisation des superplastifiants (Dreux et Festa, 1998).

La fonction de base du superplastifiant est la fluidification, puisqu'il provoque un important gain d'ouvrabilité d'un mélange. Le superplastifiant est responsable d'un effet de plastification : à même teneur en eau, il permet d'augmenter l'ouvrabilité, sans diminuer les résistances à long terme de la pâte, du mortier ou du béton pour un même rapport E/C.

Un tel béton peut être mis en place avec peu ou pas de serrage et n'est sujet ni à au ressuage excessif ni à la ségrégation, d'où sa désignation de béton fluide.

La seconde fonction « réducteur d'eau » se manifeste par la réduction du rapport E/C pour une même ouvrabilité. Ceci permet donc d'augmenter les performances mécaniques (résistance) du mélange, d'où sa désignation de béton à hautes performances.

Selon (Taleb, 2009) La réduction du rapport E/C va nous permettre d'augmenter les performances mécaniques du mélange (figure II.17). Cette réduction d'eau de gâchage va aussi directement contribuer à la diminution de la consommation d'eau dans la production des bétons. Ceci est important surtout lorsque l'approvisionnement en eau est souvent un problème.



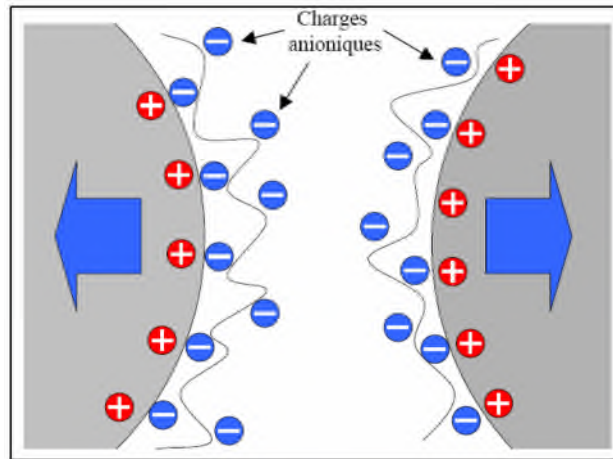
**Figure II.17.** Influence d'un superplastifiant sur la résistance à jeune âge d'un béton dosé à 370 kg/m<sup>3</sup> de ciment à maniabilité constante (selon Meyer ,1979 cité par **Boutchicha, 2007**).

Les superplastifiants sont des polymères à chaînes macro-moléculaires très longues .Ils permettent de défloculer les grains de la matrice cimentaire (ciment +additions fines) au contact de l'eau, en agissant soit par répulsion électrostatique, soit par effet stérique ou les deux en même temps, afin d'augmenter la fluidité du mélange et de disperser les particules solides.

L'effet électrostatique permet de neutraliser les charges électriques présentes à la surface des grains alors que l'effet stérique engendre l'écartement des grains les uns des autres.

➤ **L'effet électrostatique :**

Lorsqu'on ajoute un superplastifiant dans une suspension d'un matériau cimentaire, une grande partie du polymère vient se fixer par adsorption à la surface des particules solides du ciment. Cette adsorption s'effectue sur les phases hydratées du ciment. Les groupes anioniques du polymère neutralisent les différentes charges, et confèrent à la surface des particules du ciment une charge négative, et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives électrostatique entre les particules pour empêcher le contact entre les grains de ciment, et contribuent à la défloculation et la dispersion des solides dans la suspension (**Figure II.18**).

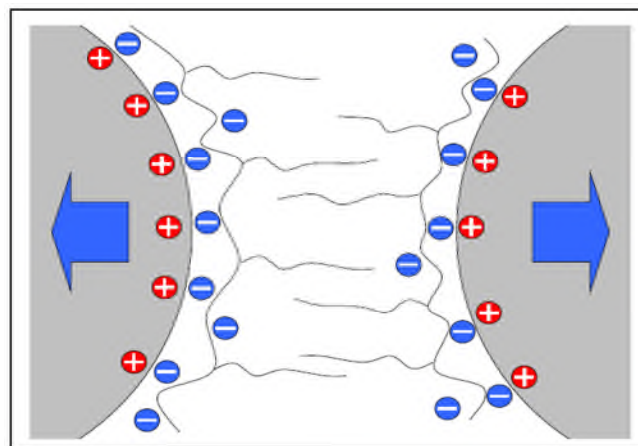


**Figure II.18.**Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment (El Barrak, 2005).

➤ **L'effet stérique :**

L'encombrement stérique est le type de répulsion créée par les superplastifiants de type polycarboxylates. Les polymères anioniques s'adsorbent à la surface des particules et les chaînes secondaires s'étendent aux alentours. Lors du rapprochement de deux grains de ciment, les couches d'absorption des superplastifiants se chevauchent. La densité de chaînes augmente et les molécules d'eau vont s'accumuler dans la solution. Cela a pour conséquence l'apparition d'une pression osmotique, laquelle maintient les particules séparées l'une de l'autre en contribuant à la dispersion du solide dans la suspension.

L'encombrement stérique apparaît dès que la distance entre les polymères adsorbés est inférieure à deux fois l'épaisseur des polymères. La **Figure II.19** représente un exemple de l'effet stérique d'un polymère adsorbé aux particules de ciment.



**Figure II.19.**Particules de ciment recouvertes de polymères à fort encombrement stérique (El Barrak, 2005).

### II.9.5.3. Influence du dosage en superplastifiant

Le dosage en superplastifiant à ajouter à une suspension cimentaire doit être suffisant pour permettre à une quantité de rester disponible dans la solution interstitielle, contribuant à obtenir une fluidité plus grande, et qui dure plus longtemps avant le début de prise de la suspension (**Taleb, 2009**).

Pour déterminer le dosage de saturation, c'est-à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la fluidité du mélange, on peut étudier la rhéologie d'un coulis (mélange d'eau et de ciment de consistance très fluide) ayant un rapport eau/ciment relativement faible, en mesurant l'étalement au mini cône ou l'écoulement au cône de Marsh. En présence du superplastifiant les polymères organiques vont limiter l'agglomération des grains, ce qui aura pour conséquence une diminution voir une suppression du seuil d'écoulement (**Rickert, 2005 cité par Tabet, 2012**).

L'incorporation du superplastifiant dans le ciment conduit à une augmentation de la fluidité des pâtes de ciment. (**Paillère et al, 1990 Cité par Dakhmouche Chabil, 2009**) mettent en évidence l'existence de trois plages de dosages influençant le maintien de la maniabilité du béton:

- une plage de faibles pourcentages d'adjuvant inférieurs à 1 % d'extrait sec. Dans cette plage, Le maintien de la maniabilité est faible, sa durée maximale étant de 15 min;
- une plage de pourcentages élevés en adjuvant. Elle concerne des dosages en superplastifiants Supérieurs à 1 % et pouvant atteindre jusqu'à 3 % en extrait sec. On constate ici un phénomène de refluidification du matériau hydraulique en fonction du temps, c'est-à-dire une augmentation de l'effet fluidifiant au cours du temps (après repos).
- une plage de pourcentages très élevés en adjuvant. Les valeurs sont supérieures à 3 ou 4% D'extrait sec. Dans cette plage, le maintien de la maniabilité est très faible.

Lorsque l'on utilise des superplastifiants à très forts dosages, (**Aitcin, 2001**) a montré que leur effet enveloppant peut retarder quelque peu l'hydratation des grains de ciment quelque soit la nature du superplastifiant, le type de ciment ou la dimension moyenne de ses grains.

En outre, il a mis en évidence l'allongement de la période dormante en étudiant l'évolution de la chaleur dégagée lors de la réaction d'hydratation et a montré que plus le dosage en superplastifiant est grand et plus l'effet retardateur est prononcé.

**Hot (2013)** a suggéré que la viscosité du fluide interstitielle et le changement de l'état de floculation dû à la présence de molécules de polymère adsorbé, serait à l'origine de la diminution plus ou moins prononcée de la viscosité macroscopique suite à l'ajout d'un polymère.

En **2000 Sugamata et col.** ont étudié l'influence de différents superplastifiants et de leurs dosages sur le maintien rhéologique dans le temps d'un mortier. Leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage en superplastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur. Cette caractéristique est maintenant bien connue. Il s'agit du dosage à saturation. Actuellement, les superplastifiants sont donc utilisés à un dosage proche du dosage à saturation.

#### **II.9.5.4. Effets des superplastifiants à long terme**

La résistance des bétons a longtemps été limitée car on ne peut pas augmenter indéfiniment les dosages de ciment sans prendre d'autres risques. Avec l'aide des superplastifiants, on va pouvoir baisser considérablement la teneur en eau des bétons tout en hydratant mieux le ciment disponible, le résultat est une augmentation des résistances finales.

Le béton d'enrobage qui est à la surface de contact avec le milieu extérieur doit faire l'objet d'une grande attention, car cette surface est susceptible de se dégrader sous l'influence de certains facteurs tels que : le manque de compacité, la perméabilité, les facteurs climatiques ou les agressions chimiques tel que le CO<sub>2</sub>. Les superplastifiants sont là pour limiter fermement ces risques, notamment en augmentant la compacité des bétons et en protégeant les armatures pour un meilleur enrobage, par contre, réduisant la porosité capillaire de la pâte de ciment.

#### **II.9.6. Influence des granulats sur les propriétés des BAP**

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les quantités optimales en gros granulats capables de donner un maximum de déformabilité et d'ouvrabilité au béton (Cité par **MENAI, 1995**).

Le volume des gros granulats dans le béton est le facteur le plus important pour le contrôle de la maniabilité et de la capacité de remplissage : plus la teneur en gros granulats augmente et plus la capacité de remplissage diminue.

**Okamura et coll. (2003)** mentionnent que le premier point dont il faut tenir compte lors de la formulation d'un BAP est de limiter la teneur en gros granulats car les bétons frais à faibles dosages en granulats se caractérisent généralement par une haute résistance à la ségrégation.

**(KHAYAT, 1999 cité par BENSEBTI, 2008)** ont déterminé les quantités optimales en gros granulats et en sable capables d'améliorer la fluidité des mélanges de béton en présence d'un agent colloïdal et de superplastifiant. La quantité des granulats (granulats concassés lavés) a été de  $300 \text{ L/m}^3$  avec une teneur de 70% de granulats de diamètre maximum 14 mm et 30% de diamètre maximum 20 mm. Quant à la quantité de sable, elle correspondait à un rapport Sable/Pâte (volumique) de 0,6.

**(Nagataki et coll, 1995 cité par BENSEBTI, 2008)** ont optimisé des bétons autoplacants en étudiant 18 formulations de béton. Ces bétons de rapport E/C de 0.45 contiennent différentes teneurs en gros granulats concassés de diamètre maximum 20 mm (de 24.5 à 34.5%), avec un dosage en ciment portland normal variant de 390 à  $450 \text{ Kg/m}^3$ . Les teneurs en superplastifiant (naphtalène) et en agent entraîneur d'air sont respectivement 3 et 0.033% de la masse du ciment. Les bétons développés ont été évalués vis-à-vis de la fluidité (diamètre d'étalement), la résistance à la ségrégation (pourcentage du mortier passant des mailles de 5 mm d'ouverture) et la capacité de remplissage des coffrages ferrailés. Egalement les caractéristiques rhéologiques des mortiers correspondants aux bétons étudiés ont été évaluées par la détermination de la viscosité et du seuil de cisaillement. L'étude a permis de définir une marge dans laquelle toutes les recommandations de fluidité et de stabilité sont satisfaites.

Le volume de gravier doit être réduit tout en utilisant des granulats aux dimensions limitées ( $D_{\text{max}} = 20\text{mm}$ ). Cette limitation du volume et de la taille des plus gros grains est faite pour assurer une bonne lubrification du système en assurant un enrobage correct et suffisant des granulats par le mortier et ainsi éviter l'apparition des phénomènes de blocage (Cité par **Diederich, 2010**).

### **II.9.7. Influence du rapport E/C sur les propriétés des BAP**

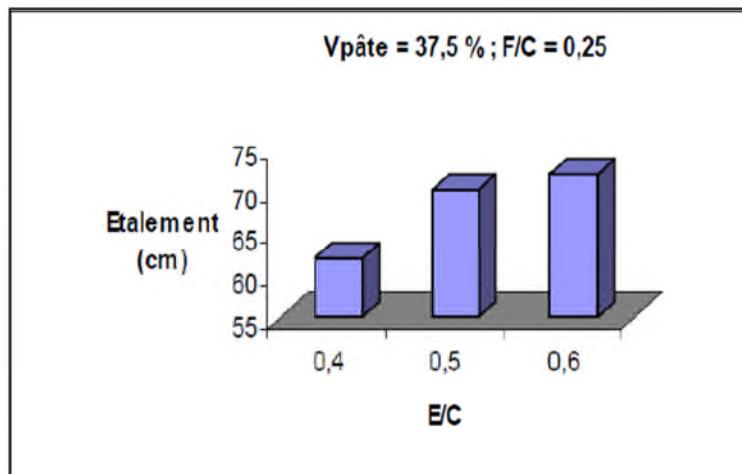
L'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et diminue la viscosité et le seuil de cisaillement.

Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais.

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, les ciments les plus courants dans le domaine de Génie Civil sont les ciments à base de clinker portland, produit obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile.

Le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié à ses propriétés mécaniques et sa durabilité. On considère que l'écoulement et l'ouvrabilité du béton sont reliés au rapport E/C qui représente un facteur très influent sur ses différents aspects, aussi la formulation des bétons ordinaires passait par l'optimisation de ce paramètre.

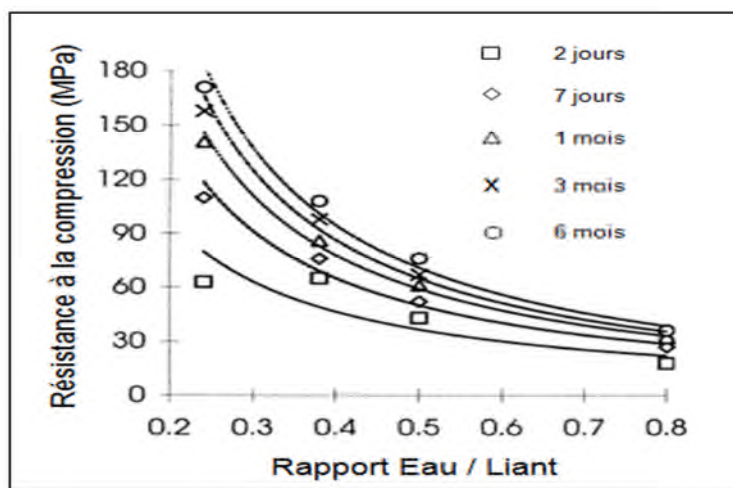
**Bouhamou et col. (2008)** ont trouvé qu'il y a une relation proportionnelle entre le rapport E/C et l'étalement, le rapport E/C implique une augmentation dans l'étalement (**Figure II.20**) ainsi ils ont conclu que le dosage en eau reste une grandeur nécessaire pour normaliser la fluidité d'un BAP.



**Figure II.20.**La variation d'étalement en fonction du rapport E/L (**Bouhamou et col ., 2008**).

La (**figure II.21**) montre que la diminution du rapport E/C influe significativement sur la résistance en compression des BAP qui est légèrement supérieure à celle du Béton Ordinaire.





**Figure II.21.** Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge (Taleb, 2009).

## II.10. Bilan

Les BAP, nouvelle innovation technologique dans le domaine des matériaux de construction. Ce sont des bétons très fluides, se mettent en œuvre sous le seul effet de la gravité, sans apport de vibration.

Le BAP est un matériau qui doit présenter deux aspects, le premier étant **la fluidité** qui le rend facile à être utilisé dans les milieux confinés (ferrailage complexe) sans apport des vibrations et le deuxième constitue **l'homogénéité** qui lui permet de résister à la ségrégation et au ressuage. Ces deux aspects sont rendus possibles en introduisant dans les formulations des adjuvants (superplastifiants) et des additions minérales (fillers calcaires, pouzzolane, ...). Plusieurs chercheurs ont essayé de développer des méthodes de formulation et d'essais simples afin de mieux caractériser ce béton.

Malgré que les BAP possèdent de bonnes résistances mécaniques, plusieurs paramètres peuvent avoir une influence significative sur leurs performances rhéologiques et mécaniques, notamment : volume de gravier, rapport massique E/C, nature et dosage d'additions minérales, et finalement la concentration en superplastifiant.

Le tableau ci-dessous récapitule l'influence de l'augmentation de ces paramètres sur les performances rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçant.

Constituent	Fluidité	Viscosité	Stabilité	Résistance à 28j
Filler	↘	↗	↗	↘
Pouzzolane	↘	↗	↗	↘
Superplastifiant	↗	↘	↘	↗
Granulat ( $D_{max}$ )	↘	↗	↗	↘
E/C	↗	↘	↘	↘

## Références bibliographiques

- **Aïtcin P.C.**, 2001 : Le béton à haute performance, Eyrolles, France.
- **AFGC.**, 2000 : Recommandations provisoires des bétons autoplaçants, Documents scientifiques et techniques – Juillet.
- **AFGC.**, 2008 : Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants, Documents scientifiques et techniques - Janvier.
- **Aissa A., Bouiadjra M.B., Trouzine H.**, 2005 : Influence des ajouts cimentaires sur le comportement des bétons» XXIIIème rencontres universitaires de Génie Civil, risque et environnement, Laboratoire de Matériaux et Hydrologie Département de Génie Civil. Université Djillali LIABES, Sidi Bel-Abbès, Algérie.
- **ALI-BOUCETTA T., BEHIM M., LAIFA W.**, 2011 : ETUDE COMPARATIVE SUR L'EFFET D'UNE MEME ADDITION INERTE OUCHIMIQUEMENT REACTIVE SUR LES PROPRIETES DES BETONS AUTOPLAÇANTS, Université Badji Mokhtar d'Annaba, Algérie.
- **Belaidi A., Brixi A.**, 2014 : étude de l'influence des additions et des adjuvants sur les propriétés de béton à états frais et durci des bétons, mémoire de master de l'université de Tlemcen, Algérie.
- **Benachour Y., Davy C.A., Skoczylas F., Houari H.**, 2008: Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar, Cement and Concrete Research, vol.38, page 727–736.
- **Bensebti S.E.**, 2008 : Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux, thèse de doctorat de l'université Mentouri-Constantine, Algérie.
- **Boudiaf M.**, 2011 : L'INFLUENCE DE L'AJOUT DE LA POUZZOLANESUR LES CARACTERISTIQUE PHYSICO-CHIMIQUE DES CIMENTS, Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme de LICENCE, Université des sciences et de la technologie d'Oran, Algérie.
- **Bouhamou N., Belas N., Mesbah H., Mebrouki A., Yahia A.**, 2008 : Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais, Afrique science 04 (1), pp 1 – 20.
- **Boudchicha A.**, 2007 : Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons, thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine, Algérie.
- **CISSIGH F.**, 2007. BAP in Technique Ingénieur. C2217.

- **DENIS P.E.**, 2007 : OPTIMISATION DU BÉTON AUTOPLAÇANT : MISE EN PLACE EN LABORATOIRE ET SUR CHANTIER, Master Mécanique et Ingénierie, Ecole Nationale supérieure des Mines.
- **DREUX G., FESTA J.**, 1998 : Nouveau guide du béton et ses constituants, éditions Eyrolles, Paris.
- **Diederich P.**, 2010 : Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton, thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- **El Barrak M.**, 2005 : Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais, thèse de doctorat, l'université Toulouse III – Paul Sabatier, France.
- **EL Hilali A.**, 2009 : Etude expérimentale de la rhéologie et du Comportement des bétons autoplaçants (BAP): Influence des fines calcaires et des fibres végétales, thèse de doctorat, l'université Cergy Pontoise, France.
- **FARES H.**, 2009 : Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à un température élevé, thèse de Doctorat, Ecole doctorale sciences et Ingénierie, Université de cergy-pontoise.
- **Felekoglu B.**, 2007: Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), Resources Conservation & Recycling, vol.51, page 770–791.
- **Felekoglu B.**, 2008: A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete, Construction and Building Materials, vol.22, page 646–654.
- **(JSCE, 98)** Japanese Society of civil Engineering. (1998), Guide to Construction of High Flowing Concrete engineering, Gihoudou Pub, Tokyo, au Japan.
- **Hot J.**, 2013: Influence des polymères de type superplastifiants et agents entraîneurs d'air sur la viscosité macroscopique des matériaux cimentaires, thèse de doctorat, Université Paris-Est, France.
- **KHELIFA M R.**, 2009 : Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants, thèse de doctorat de l'université d'Orléans, Constantine. Algérie.
- **Krachai R.M., Bouabdallah M.A., bdelhadi H.A., Hamou k.**, 2009 : influence de la pouzzolane de beni-saf sur les performances mecaniques des betons autoplaçants, 1st

International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran, Algérie.

- **MENAI K.**, 1995 : Etude de l'Effet d'ajouts Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants, Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Spécialité : Génie Civil. Université de Sherbrooke, CANADA.
- **Moukhtari A.**, 2006 : Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier, mmoire de magister , UNIVERSITÉ DE KASDI MERBAH OUARGLA, Algérie.
- **NEHDI M.**, 2000 : Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials", Cement and Concrete Research, Vol 30 pp 1603-1669.
- **Okamura H., Ozawa K.**, 1995 : Mix design for self compacting concrete, Concrete library of JSCE, N° 25, pp 107-120.
- **Okamura H., Ouchi M.**, 2003: Self – compacting concrete, Journal of advanced concrete technology, Vol 1, N°1, pp. 5 – 15, April, Japan.
- **SED** : Sedran T., 1999 : Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants, thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- **Siad H.**, 2010 : Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants, thèse de doctorat, l'institut National des Sciences Appliquées de Rennes, France.
- **Su N., Hsu K.C., Chai H.W.**, 2001: A simple mix design method for self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, vol. 31, n° 12, page 1799-1807.
- **Su N., Miao B.**, 2003: A new method for mix design of medium strength concrete with low cement content, Cement and Concrete Composites, vol.25, page 215-222.
- **Tabet N.**, 2012 : Contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico- mécanique des bétons autoplaçants fibres (BAPF), Mémoire de magister, l'université M'hamed bougra-Boumerdes, Algérie.
- **Taleb O.**, 2009 : Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux, mémoire de magister de l'université de Tlemcen, Algérie.
- **Turcry P.**, 2004 : Retrait et Fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France.

- **Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y., 2005:** Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, *Cement and Concrete Research*, vol. 35, page 532– 539.

---

# CHAPITRE III

## Caractérisation des matériaux

---

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons dans un premier temps les caractéristiques des matériaux utilisés pour la formulation des bétons, et particulièrement les granulats puisqu'ils occupent les trois quarts de leur volume. Leurs caractéristiques sont déterminées au moyen d'un certain nombre d'essais normalisés et effectués dans le laboratoire du département de génie civil de l'Université de Tlemcen.

Nous présentons par la suite la caractérisation rhéologique de la matrice cimentaire et la détermination du dosage de saturation en superplastifiant pour lequel, deux essais ont été utilisés celui du mini cône ainsi que celui du cône de Marsh.

### III.2. Les granulats

On appelle « granulats » ce qui constitue l'ensemble des matériaux granulaires, non cohérents et qui, agglomérés par un liant, forment le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de sables et de graviers de diverses dimensions.

Un granulats est caractérisé par sa classe  $d/D$ ,  $d$  et  $D$  étant respectivement la plus petite et la plus grande dimension des grains.

Selon **BERKAT (2006)** Les granulats destinés aux bétons hydrauliques sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles :

- La catégorie « A » : correspond aux granulats destinés à la confection de béton de qualité (ouvrages d'art ou bâtiments pour lesquels la résistance caractéristique  $R_c \geq 35 \text{ MPa}$ ).
- La catégorie « B » : correspond aux granulats destinés à de bons bétons, à la condition que leur coefficient d'absorption ( $\leq 2.5 \%$ ) respecte les spécifications imposées aux granulats de catégorie « A ».
- La catégorie « C » et « D » : granulats pour confectionner des bétons courants à la condition que seules deux de leurs caractéristiques soient présentes et que les autres correspondent à celle des catégories supérieures.

Les granulats utilisés proviennent de la carrière de Sidi Abdelli, propriété de l'Entreprise Nationale des Granulats (**ENG**). Ce choix est dicté par le fait que c'est la carrière qui approvisionne principalement la région à cause de son importance en production.



### III.2.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer la granularité (la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat).

L'essai consiste à classer à l'aide de tamis les différents grains qui constituent l'échantillon selon leur diamètre. Pour cela en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé dans le tamis supérieur et le classement des grains s'obtient par vibration de l'ensemble de la colonne des tamis à l'aide d'une machine à tamiser électrique qui imprime un mouvement vibratoire (**Figure III.1**).



**Figure III.1.** Machine à tamiser électrique.

Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. La représentation graphique de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement.

Dans notre cas on a utilisé la procédure de tamisage par voie sèche qui est conforme à la norme NA 2607, pour les deux matériaux : sable et gravier.

Les résultats de l'analyse granulométrique établie pour chaque fraction sont présentés dans les Tableaux III.1 et III.4, III.5, III.6.

#### III.2.1.1. Le sable

Le sable est un granulat calcaire concassé est commercialisé en tant que classe granulaire 0/4.

**Tableau III.1.**Analyse granulométrique du sable.

Sable 0/4				
La masse sèche de sable = 1 kg ≥ 0.2 D (D en mm)				
Ouverture des tamis (mm)	masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés(%)
6.3	0.6	0.6	0.06	99.94
5	0.6	1.2	0.12	99.88
4	31.2	32.4	3.24	96.76
3.15	50.2	82.6	8.26	91.74
2.5	96.2	178.8	17.88	82.12
2	86	264.8	26.48	73.52
1.6	112.8	377.6	37.76	62.24
1.25	61.4	439	43.9	56.1
1	64.4	503.4	50.34	49.66
0.8	45.6	549	54.90	45.1
0.63	52.2	601.2	60.12	39.88
0.5	71.2	672.4	67.24	32.76
0.4	39.2	711.6	71.16	28.84
0.315	62.8	774.4	77.44	22.56
0.250	4.2	778.6	77.86	22.14
0.2	17.6	796.2	79.62	20.38
0.16	37.2	833.4	83.34	16.66
0.125	15.8	849.2	84.92	15.08
0.080	16.8	866	86.60	13.4
Fond	134	1000	100	0

➤ **Module de finesse du sable « M<sub>f</sub> »**

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse « M<sub>f</sub> ». La norme XP P 18-540 définit le module de finesse d'un sable qui caractérise sa granularité comme le 1/100 émet de la somme des refus, exprimés en pourcentages, sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5,0 mm, et est déterminée par la formule suivante :

$$M_f = \frac{1}{100} \sum_{i=0.16}^5 Ri \quad (III.1)$$

D'après l'analyse granulométrique du sable, avons obtenu les pourcentages des refus cumulés sur les tamis suivants:

D=0.16 mm	83.34%	
D=0.315 mm	77.44%	
D=0.63 mm	60.12%	total=282.8
D=1.25 mm	43.9 %	
D=2.5 mm	17.88%	
D=5 mm	0.12%	$M_f$ : module de finesse = (1/100) x 282.8=2.83

Le module de finesse du sable est une caractéristique importante qui influe sur le comportement d'un mélange de béton.

Le **tableau III.2** indique les spécifications techniques pour les sables.

**Tableau III.2.**Spécification techniques pour les sables.

Granulat	Sable 0/4	Spécifications
Module de finesse $M_f$	2.5	2.8< $M_f$ <3.2 : sable grossier 2.2< $M_f$ <2.8 : sable moyen 1.8< $M_f$ <2.2 : sable fin

Pour un sable, plus le module de finesse est faible, plus le sable est riche en éléments fins ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau, et plus le module de finesse est élevé, le sable manque de fines et le béton perd en ouvrabilité.

#### ➤ Pourcentage des fins

Pour déterminer le pourcentage des fins on pese 1Kg de sable ( $m_1$ ), puis on le lave avec de l'eau dans le tamis de 80  $\mu m$  (tamisage effectué sous l'eau) et on l'introduit dans l'étuve pendant 24h et ensuite il est pesé, la masse sèche obtenue est  $m_2 = 866.4$  g

$$\% \text{ de fins} = \frac{1000-866.4}{1000} \times 100 = 13.36\% \quad (\text{III.2})$$

D'après la norme XP P 18 – 540, la teneur en fines d'un granulat est définie par le passant à 0,08 mm. La norme indique la teneur maximale en fines dans les sables mesurée sur la fraction 0/4 mm en fonction de la catégorie des granulats :

**Tableau III.3.**Teneur en fines de la fraction 0/4 mm.

Catégorie	Passants (%) au tamis de 0.08 mm
A	$\leq 12$
B	$\leq 15$
C	$\leq 18$
D	Pas de spécifications

L'analyse granulométrique pour le sable nous a donné, une teneur en fines de 13.36 % et un module de finesse de 2.83.

La carrière de l'ENG produit un sable avec un module de finesse respectif grossier avec de légère discontinuité (**Figure III.2**). Au vue de ces résultats, le sable est conforme aux exigences de la norme P 18-541 qui fixe un module de finesse compris entre 1,8 à 3,2 pour les sables de catégories A et B, et exige un module optimum de 2,5.

Le pourcentage en fines du sable est resté inférieur à 20%. Dans le cadre de notre étude, nous l'avons utilisé tel quel. Nous n'avons pratiqué aucun traitement (lavage) pour la réalisation des formulations de bétons préconisés.

### III.2.1.2. Le gravier

Les graviers de l'ENG sont disponibles sous forme des classes granulaires 4/8, 8/16 et 16/25.

**Tableau III.4.**Analyse granulométrique du gravier 16/25.

Gravier 16/25				
Poids de l'échantillon = 5 kg				
Ouverture de tamis (mm)	masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés(%)
40	0	0	0	100
31.5	0	0	0	100
25	100	100	2	98
20	1912	2012	40.24	59.76
16	2386	4398	87.96	12.04
12.5	540	4938	98.76	1.24
10	32	4970	99.4	0.6
Fond	30	5000	100	0

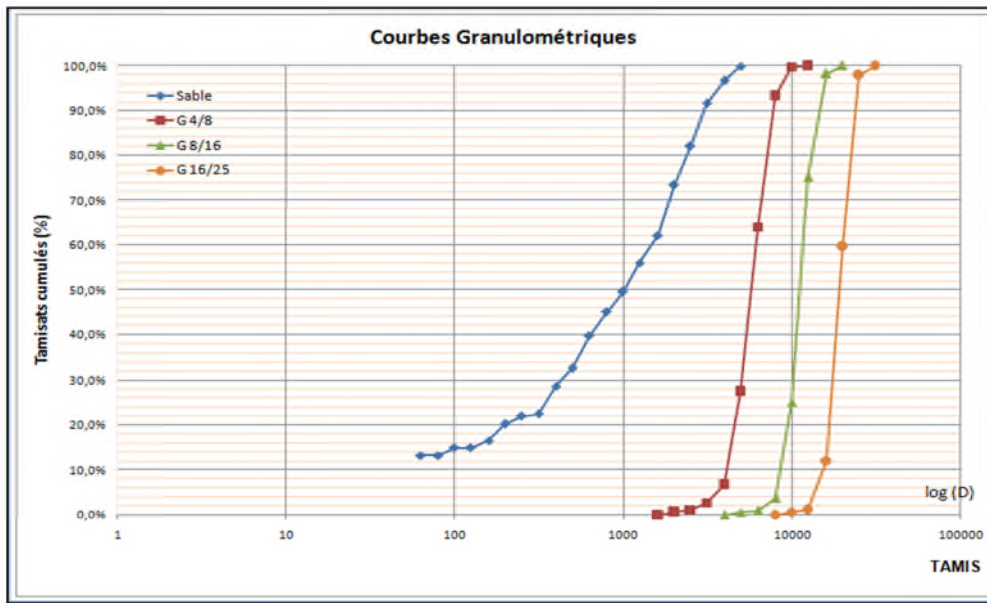
**Tableau III.5.**Analyse granulométrique du gravier 8/16.

Gruvier 8/16				
Poids de l'échantillon = 3.2 kg				
Ouverture de tamis (mm)	masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés(%)
25	0	0	0	100
20	0	0	0	100
16	56	56	1.75	98.25
12.5	736	792	24.75	75.25
10	1600	2392	74.75	25.25
8	682	3074	96.06	3.94
6.3	90	3164	98.87	1.13
5	10	3174	99.18	0.82
Fond	20	3194	99.81	0.19

**Tableau III.6.**Analyse granulométrique du gravier 4/8.

Gruvier 4/8				
La masse de l'échantillon = 1.6 kg				
Ouverture de tamis (mm)	masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés(%)
12.5	0	0	0	100
10	6	6	0.375	99.62
8	98	104	6.50	93.50
6.3	468	572	35.75	64.25
5	576	1148	71.75	28.25
4	328	1476	92.25	7.75
3.15	66	1542	96.38	3.62
2.5	24	1566	97.87	2.13
2	6	1572	98.25	1.75
Fond	12	1584	99	1

La **Figure III.2** représente les courbes granulométriques des différents granulats étudiés.



**Figure III.2.** Courbes granulométriques des granulats.

### III.2.2. Propreté des granulats

Selon **BARKAT (2006)**, l'utilisation des granulats pollués, présence d'argile à la surface des granulats ou autres impuretés, provoquant une réduction des résistances mécaniques et une augmentation du retrait, sans oublier l'incidence de l'excès d'eau sur les caractéristiques du béton. Les impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats-pâte, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton.

Il est impératif donc, que la propreté des granulats doit être toujours vérifiée, que ce soit, celle des sables ou des gravillons.

L'essai de propreté des granulats consiste à déterminer le pourcentage d'éléments **inférieurs à 0.5 mm** conformément à la norme NF P18-591.

#### III.2.2.1. Essai d'équivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable conforme à la norme NF EN 933-8, permet de mesurer leurs propreté, cet essai est en général utilisé pour les sables destinés au béton. L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité lavante dans un cylindre gradué et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon.

On complète alors le sable en utilisant le reste de solution lavante afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 min, les hauteurs des produits

sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée, exprimé en pourcentage et ceci conformément à la norme NF P 18-598.

Les résultats de l'équivalent de sable sont récapitulés dans le **tableau III.7.**

**Tableau III.7.**L'équivalent de sable pour deux éprouvettes.

Echantillon de sable	Hauteur totale h1	Hauteur du sable h2	ESV (visuel) (h2/h1)× 100	Hauteur tassée au piston (h2')	ESP (au piston) (h2'/h1)× 100
Eprouvette 1	9.5	7.7	81.06 %	9.1	95.79 %
Eprouvette 2	9.6	7.5	78.12 %	8.8	91.67 %

Les essais nous ont donné un équivalent de sable visuel de 79.6 % et un équivalent de sable au piston de 93.7 %. La carrière de l'ENG produit donc un sable propre qui répond aux exigences de la norme P 18-541, qui fixe les limites à  $ESV \geq 65$  et  $ESP \geq 60$  pour les sables concassés ou broyés.

### III.2.2.2. Propreté des graviers

A l'instar de ce qui se pratique pour les sables, les graviers doivent être propres avant leur utilisation dans la fabrication des bétons.

Pour quantifier la présence d'éléments fins ou argileux à la surface des granulats supérieurs à 2 mm. La propreté superficielle « P » est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules **inférieures à 0,5 mm** mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2 mm. L'essai consiste à séparer les éléments fins par lavage et la propreté superficielle « P » est calculé selon la formule suivante :

$$P(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 \quad (\text{III.3})$$

Avec :

M<sub>0</sub> : Masse d'échantillon.

M<sub>1</sub> : Masse d'échantillon après lavage.

Les résultats de l'essai sont consignés sur le **tableau III.8.**

**Tableau III.8.**Résultats de l'essai sur les impuretés des graviers.

Classe granulaire	Masse d'échantillon M <sub>0</sub> (g)	Masse d'échantillon après lavage M <sub>1</sub> (g)	La propreté superficielle P (%)
Gravier 4/8	100	98	2.04
Gravier 8/16	300	299	0.33
Gravier 16/25	300	299.4	0.20

Le gravier utilisé présente une propriété satisfaisante puisque, selon les spécifications exigées par la norme P 18-541, le pourcentage des éléments inférieurs à 0.5 mm doit être inférieur à 3 % dans le cas des granulats concassés.

### III.2.3. Masses volumiques apparente et absolue

Nous avons déterminé les masses volumiques apparente et absolue des graviers conformément à la norme NA 255. Pour la détermination de la masse volumique absolue des graviers, nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée qui est une méthode simple et rapide, mais pas très précise et la méthode du ballon qui elle est plus précise, mais délicate.

#### ➤ La masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et le volume des vides.

#### ➤ la masse volumique absolue

C'est la masse de l'unité de volume absolue du corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps, sans tenir compte du volume des vides.

Les résultats des masses volumiques obtenus pour les différents graviers, sont récapitulés sur le **tableau III.9**.

**Tableau III.9.** Masses volumiques apparentes et absolues des granulats.

Classe granulaire	La masse volumique apparente (Kg / m <sup>3</sup> )	La masse volumique absolue (Kg/ m <sup>3</sup> )	
		Méthode de l'éprouvette Graduée	Méthode du ballon
Sable 0/4	1584.5	2542.37	2659.57
Gravier 4/8	1378.6	2500	2650.17
Gravier 8/16	1333.33	2500	2626.97
Gravier 16/25	1317	2500	2669.04

Les graviers utilisés ont donné des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620. La masse volumique apparente est comprise entre 1300 kg/m<sup>3</sup> et 1600 kg/m<sup>3</sup> et la masse volumique absolue est nettement plus élevée et est comprise entre 2500 kg/m<sup>3</sup> et 2700 kg/m<sup>3</sup>.

### III.2.4. Résistance à la fragmentation

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles (LA). L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le



matériau (5 kg de l'échantillon) aux chocs de boulets métalliques normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles pendant 15 minutes. L'essai ainsi que le calcul du coefficient Los Angeles ont été effectués conformément à la norme NF P 18-573.

Le pourcentage du passant P au tamis de 1,6 mm, récupéré par la suite, représente le coefficient Los Angeles « LA » :

$$LA = \frac{P}{5000} \times 100 \quad (\text{III. 4})$$

Les résultats de l'essai Los Angeles sont récapitulés dans le **tableau III.10**.

**Tableau III.10.**Coefficient Los Angeles des granulats.

Classe granulaire	coefficient Los Angeles (%)
Gravier 4/8	32.42
Gravier 8/16	24.8
Gravier 16/25	30.4

La norme XP P 18 - 540 indique les valeurs maximales du coefficient Los Angeles « LA » en fonction de la catégorie des granulats :

**Tableau III.11.**Valeur Spécifiées Supérieures du Coefficient Los Angeles.

Catégorie	Vss en (%)
A	30
B et C	40
D	50

On remarque que le gravier utilisé répond aux exigences de la norme P 18-540 qui impose un coefficient Los Angeles inférieures à 40 %.

### III.2.5. Absorption des granulats

L'absorption de l'eau par les granulats a été déterminée conformément à la norme NF P 18-554. Selon (**Dreux et Festa cité par BARKAT, 2006**) les différents textes réglementaires pour définir la qualité des granulats, prennent en considération leur coefficient d'absorption d'eau, plutôt que d'imposer des valeurs limites de porosité.

Le coefficient d'absorption d'eau « Ab » est défini comme étant le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par une imbibition partielle en eau pendant 24 h, à la masse sèche de l'échantillon. En effet, il permet de mesurer le volume des pores accessibles à



l'eau. Plus sa valeur est élevée, moins la durabilité du béton est assurée dans un milieu agressif. On détermine le coefficient d'absorption d'eau « Ab » par la formule suivante :

$$Ab = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100 \quad (\text{III. 5})$$

M1 : Masse des granulats humides.

M2 : Masse des granulats secs.

Les coefficients d'absorption des différents granulats sont récapitulés dans le **tableau III.12**.

**Tableau III.12.** Les coefficients d'absorption des différents granulats.

Classe granulaire	M1(g)	M2 (g)	coefficient d'absorption d'eau (%)
Sable 0/4	811.6	800	1.45
Gravier 4/8	102	100	1.27
Gravier 8/16	301	300	0.33
Gravier 16/25	302.4	300	0.8

La norme XP P 18 - 540 indique les valeurs spécifiées supérieures du coefficient d'absorption d'eau « Ab » en fonction de la catégorie des granulats :

**Tableau III.13.** Valeurs Spécifiées Supérieures du Coefficient d'absorption d'eau.

Catégorie	Valeur spécifique supérieur
A	2.5 %
B	5 %
C	6 %
D	Pas de précision

Les graviers de la carrière présentent des coefficients d'absorption  $\leq 5$  % qui répondent aux exigences de la norme P18-540.

### III.3. Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment de type portland composé CPJ CEM II 42.5/A conforme à La norme NF P 15-301. Il provient de la Société des Ciments de Béni-Saf appartenant à la wilaya d'Ain-Temouchent.

Les propriétés minéralogiques et physiques sont résumées dans les **tableaux III.14 et III.15**.

**Tableau III.14.**Composition minéralogique du ciment (%) (SCIBS, 2014).

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
52.63	23.68	8.66	10.71

**Tableau III.15.**Propriétés physico – mécaniques du ciment (SCIBS, 2014).

Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3649
Consistance (%)	26.32
Expansion à chaud (mm)	0.36
Début de prise (mn)	140
Résistance à la flexion 02 jours (bars) 07 jours (bars) 28 jours (bars)	4.11 5.91 7.24
Résistance à la compression 02 jours (bars) 07 jours (bars) 28 jours (bars)	16.94 31.67 46.02

### III.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée Pour la confection des différents bétons est distribuée par le réseau du service public de la Daira de Chetouane appartenant à la ville de Tlemcen (Algérie). Ses caractéristiques chimiques répondent aux prescriptions de la norme XP P 18-303 et sont présentés dans le **tableau III.16.**

**Tableau III.16.**Caractéristiques chimiques de l'eau (Boukli Hacène, 2010).

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	CO3	NO3	PH	T (°C)
74.4	49	40	5	95	170	300	42.3	7.5	17.1

### III.5. Identification du superplastifiant

Pour notre étude, nous avons choisi d'utiliser quatre types adjuvants. Le premier est désigné sous l'appellation (SUPERIOR RM 34 S 12), c'est un superplastifiant haut réducteur d'eau

destiné pour la confection des bétons de très haute qualité. Il est conçu à base de Poly carbones de silicates modifiés, et il est compatible avec tous les types de ciments.

Selon la fiche technique (version mars 2013), « SUPERIOR RM 34 » est conforme à la norme EN 934-2. Ses Caractéristiques sont les suivantes :

➤ Caractéristiques du « SUPERIOR RM 34 »

Aspect .....	liquide
Couleur .....	Miel
Densité .....	$1.08 \pm 0.02$
Ph .....	$5.5 \pm 1$
Teneur en chlorures .....	$\leq 0.1\%$
Extrait sec .....	$28\% \pm 2$

Le deuxième adjuvant est aussi un superplastifiant très haut réducteur d'eau commercialisé par l'entreprise GRANITEX sous le nom de MEDAFLOW 30. Conçu à base de polycarboxylates qui améliore considérablement les propriétés des bétons.

Le MEDAFLOW 30 permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable. Cet adjuvant n'a aucun effet retardateur.

➤ Caractéristiques de « MEDAFLOW 30 »

Aspect .....	liquide
Couleur .....	jaunâtre
Densité .....	1.07
Ph .....	6 à 6.5
Teneur en chlorures .....	$\leq 1\text{g/L}$

Le troisième adjuvant est désigné sous l'appellation (GLENIUM 26 SCC), c'est un mélange de nouvelle génération, basé sur l'éther polycarboxylate modifiée, il est compatible avec tous les ciments.

➤ Caractéristiques du « GLENIUM 26 SCC »

Forme ..... Liquide visqueux  
Couleur ..... Brun  
Densité (g / ml à 20 ° C) ..... 1,026 à 1,066  
Plages de dosage recommandé ..... 0.3 à 2%  
Extrait sec ..... 35%

Le quatrième est de type superplastifiant haut réducteur d'eau avec effet retardateur spécialement formulé pour le béton prêt à l'emploi. Il est désigné sous l'appellation « TEK–SUPERFLOW 2000 R ».

➤ Caractéristiques de « TEK–SUPERFLOW 2000 R »

Forme ..... Liquide  
Couleur ..... Brun  
Densité (g / ml à 20 ° C) .....  $1,17 \pm 3 \%$   
PH à 20°C .....  $9.5 \pm 1$   
Teneur en chlorures .....  $\leq 1\%$   
Extrait sec .....  $35\% \pm 2\%$

### III.6. Dosage de saturation

Du point de vue économique, on a intérêt à utiliser le moins d'adjuvant possible. Pour cela nous avons déterminé le dosage maximum d'adjuvant pour une quantité de ciment donné par deux méthodes (essai du mini cône et essai de cône de Marsh). Le principe de ces manipulations est de déterminer que lorsque la quantité d'adjuvant augmente, la fluidité de la pâte augmente, mais il existe un certain dosage pour lequel la pâte est saturée en adjuvant et au delà duquel la fluidité n'augmente plus. C'est le dosage recherché.

#### III.6.1. Essai au mini cône (NF EN 191-1)

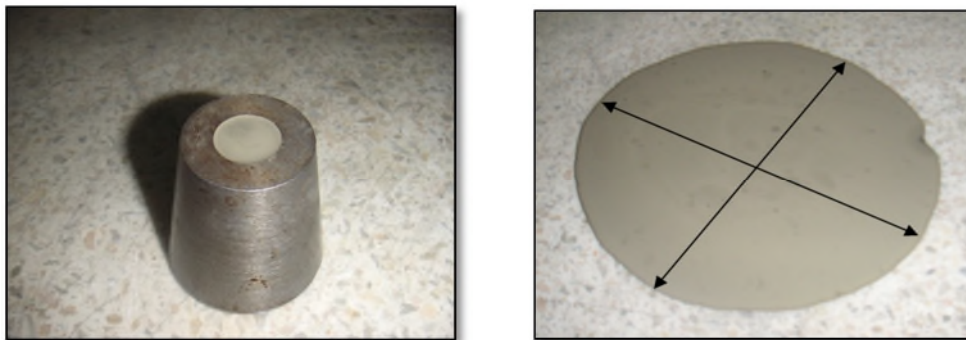
Selon la norme NF EN 1961, Le dosage de saturation en superplastifiant a été déterminé par la méthode du mini cône. Ce matériel (**figure III.3**) dispose des dimensions proportionnelles à celles du cône d'Abrams. Il permet de mesurer le diamètre d'étalement d'un volume de pâte de ciment sur une plaque horizontale.



**Figure III.3.**Mini cône.

Cette méthode consiste à évaluer le dosage de saturation de trois types de superplastifiants (Granitex, Glenium 26, Superior RM) à travers un essai d'étalement sur une très petite quantité de pâte de ciment (200 g de ciment avec un rapport E/C égale à 0,45).

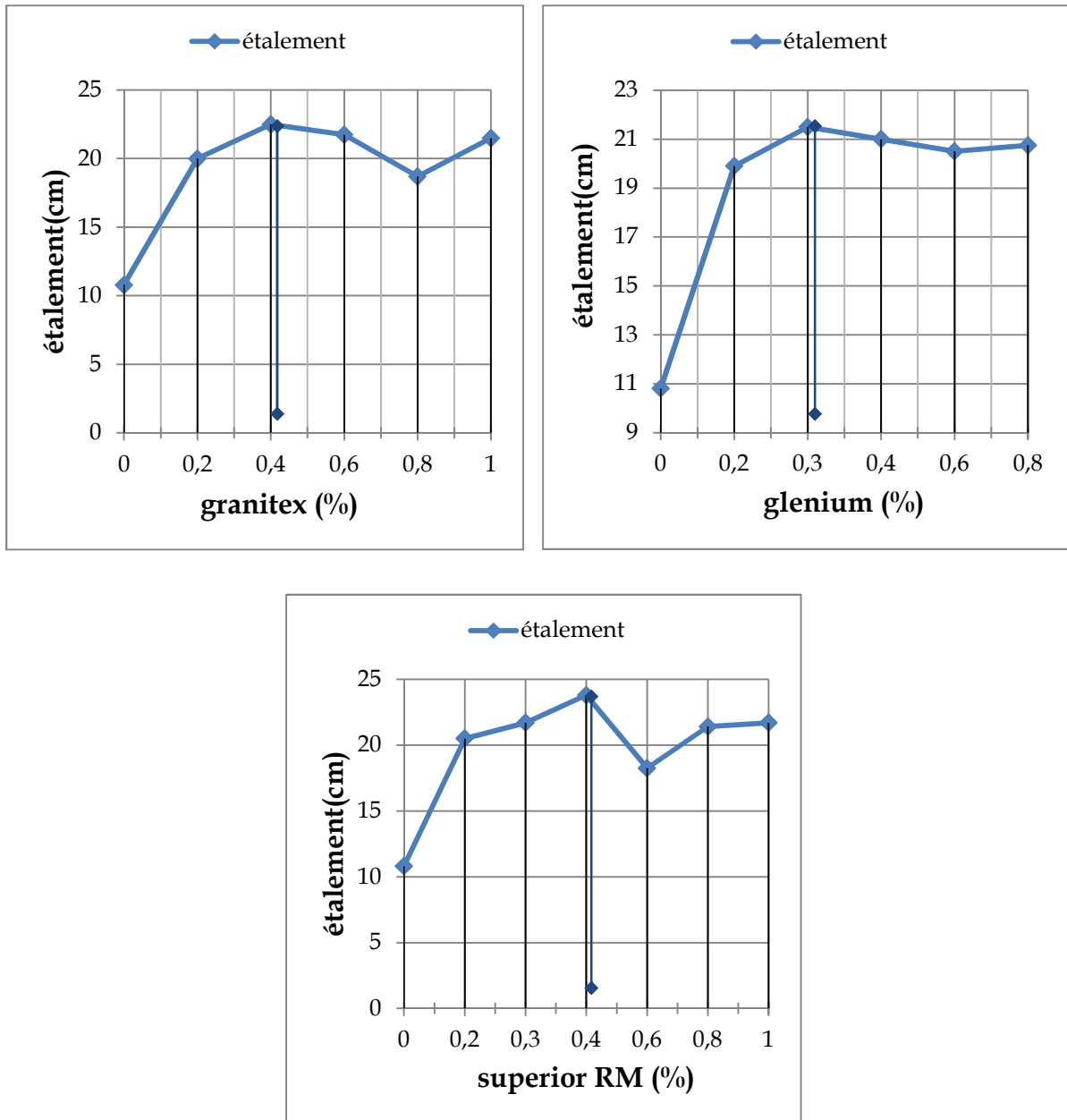
Le cône est placé au centre d'une plaque horizontale, il est rempli de pâte de ciment directement après la fin du malaxage de celle-ci. Le cône est ensuite soulevé et la pâte s'écoule sur la plaque. Les diamètres d'étalement sont mesurés selon deux axes perpendiculaires (**figure III.4.**), et la moyenne est considérée comme la valeur d'étalement au mini cône. Ces diamètres sont mesurés après 1 minute d'étalement.



**Figure III.4.**Essais de mini cône.

Le principal avantage de cet essai consiste dans la facilité et la rapidité d'exécution puisqu'il ne nécessite qu'une faible quantité de matériaux (volume inférieur à 40 ml et la masse de liant égale à 200 g). La procédure expérimentale engagée pour un mélange doit se faire d'une façon identique pour tous les mélanges.

Les courbes de la **Figure III.5** montrent l'évolution de l'étalement en fonction du dosage en adjuvant.



**Figure III.5.** Variation de l'étalement de la pâte de ciment en fonction du dosage en Superplastifiant.

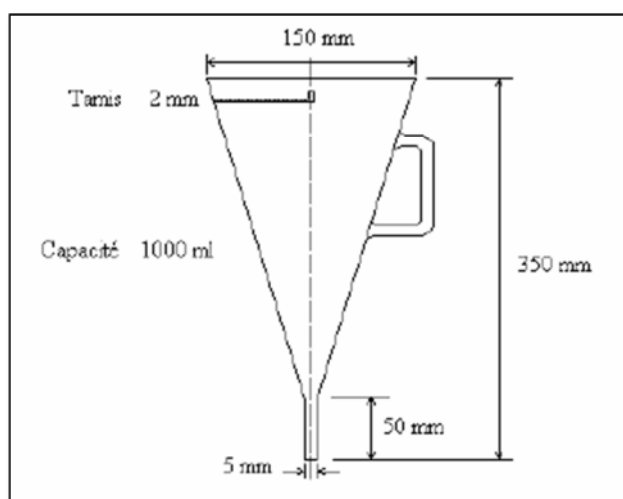
Les résultats de cet essai ont montrés que :

- ❖ Les diamètres d'étalement des pâtes autoplaçantes augmentent (diminution du seuil de cisaillement) sous l'effet du superplastifiant, jusqu'à atteindre le dosage de saturation. Au-delà du point de saturation, il est inutile de rajouter du superplastifiant dans la pâte car nous n'améliorons en rien la fluidité de la pâte de ciment.

- ❖ Nous avons trouvé que le dosage de saturation pour le premier superplastifiant (granitex) est de l'ordre 0,4%. Cependant le dosage maximal du deuxième superplastifiant (glenium 26) est de l'ordre de 0,3%.et pour le dernier superplastifiant (superior RM) est de l'ordre de 0,4%.

### III.6.2. Essai au cône de Marsh (NF P 18 358)

Pour déterminer le dosage de saturation en superplastifiant, on a aussi, utilisé la méthode du cône de Marsh (**figure III.6**). Cette méthode est utilisée depuis longtemps par l'industrie pétrolière pour mesurer la fluidité des coulis de ciment ou de bentonite. C'est pourquoi cette technique est adoptée pour la mesure de la fluidité et l'étude des propriétés rhéologiques des coulis de ciment.



**Figure III.6.**Cône de Marsh (HALLAL, 2011).

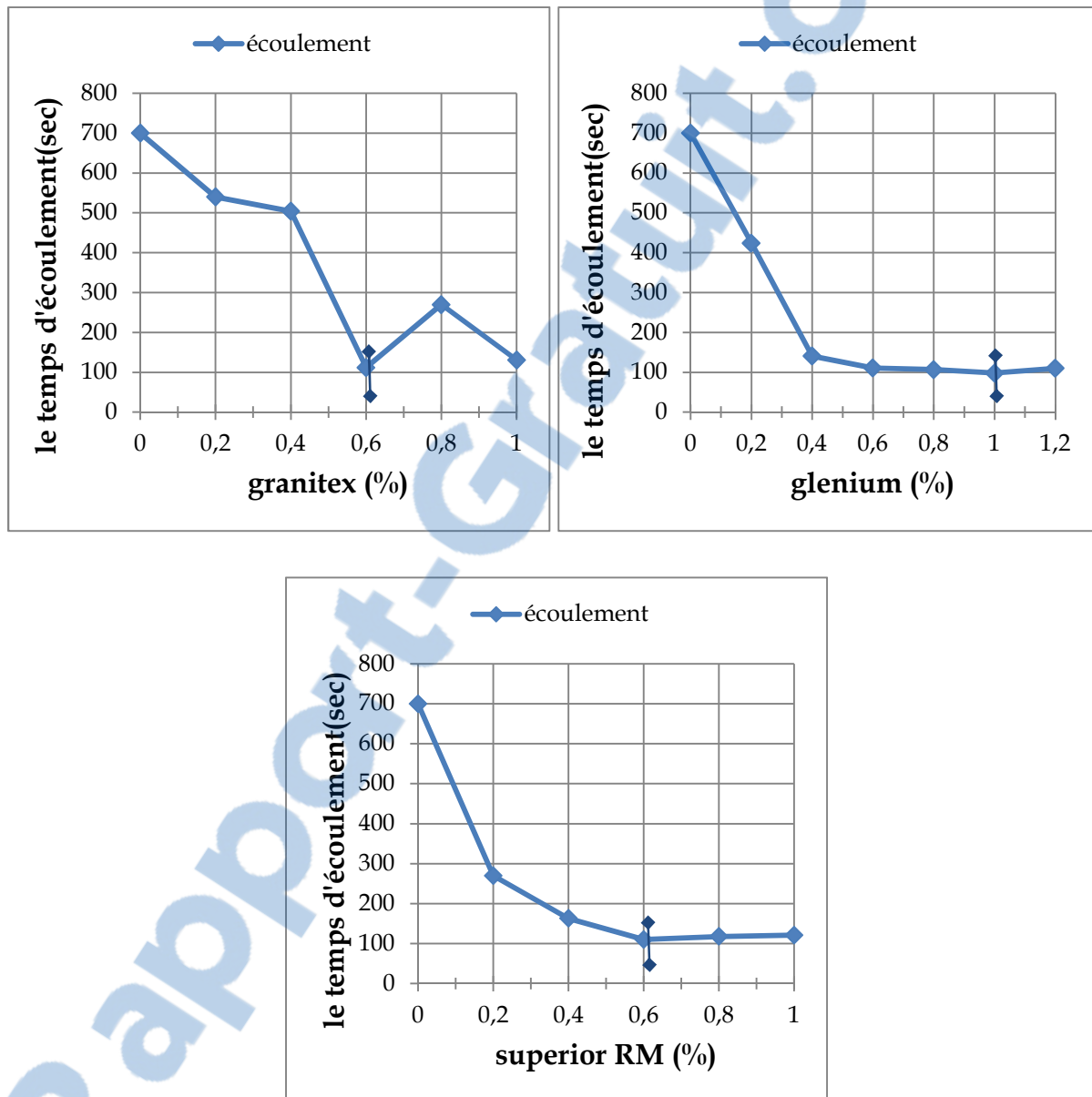
Le principe de l'essai consiste à mesurer le temps qu'il faut pour vider un cône contenant un volume donné de pâte à travers un orifice d'évacuation de 5 mm de diamètre. Le cône de Marsh doit être solidement fixé pour ne pas être déplacé par les vibrations et sa partie supérieure doit être horizontale.

Cette méthode consiste à évaluer le dosage de saturation de trois types de superplastifiants (Granitex, Glenium 26, Superior RM) à travers un essai d'écoulement sur une quantité de pâte de ciment (1.8Kg de ciment avec un rapport E/C égale à 0,45). On commence par obturer l'orifice d'évacuation inférieure et on verse un volume donné de pâte dans le cône. On démarre le chronomètre au moment où on libère l'orifice. On arrête le chronomètre dès que la



quantité de la pâte s'est déversée dans un cylindre gradué que l'on place sous l'orifice du cône. La procédure expérimentale engagée pour un mélange doit se faire d'une façon identique pour tous les mélanges.

Les courbes de la **Figure III.7** montrent l'évolution de temps d'écoulement de la pate en fonction du dosage en adjuvant.



**Figure III.7.** Variation de l'écoulement de la pâte de ciment en fonction du dosage en superplastifiant.

Les résultats de cet essai ont montré que :

- ❖ Le temps d'écoulement que l'on mesure permet d'évaluer la fluidité de la pâte. Plus ce temps est long, plus la fluidité diminue et plus il est court, plus la pâte est fluide. Donc la fluidité d'une pâte est inversement proportionnelle au temps d'écoulement.
- ❖ Les temps d'écoulement des pâtes autoplaçantes diminuent sous l'effet du superplastifiant, jusqu'à atteindre le dosage de saturation. Au-delà du point de saturation, le temps d'écoulement au cône de Marsh ne décroît plus d'une manière appréciable, il est inutile de rajouter du superplastifiant dans la pâte car nous n'améliorons en rien la fluidité de la pâte de ciment.
- ❖ Nous avons trouvé que le dosage de saturation pour le premier superplastifiant (granitex) est de l'ordre 0.6%. le dosage maximal du deuxième superplastifiant (glenium 26) est de l'ordre de 1%. et pour le dernier superplastifiant (superior RM) est de l'ordre de 0,6%.

### **III.7. Fillers calcaires**

Les fillers calcaires proviennent de la carrière de l'Entreprise Nationale Algérienne des Granulats (E.N.G). La roche est de nature calcaire dolomitique.

Les caractéristiques des Fillers calcaires sont résumées comme suit :

Forme ..... poudre  
Aspect ..... homogène  
Densité absolue ..... 2,75  
Surface massique ..... 2416cm<sup>2</sup>/g

### **III.8. La pouzzolane naturelle**

Nous avons utilisé une pouzzolane naturelle d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamedi situé au sud de Beni-Saf (Algérie).

Les pouzzolanes naturelles sont des roches habituellement constituées de scories volcaniques basaltiques. Elles sont essentiellement composées de silice et d'alumine. Elles sont assez largement utilisées en génie civil, principalement à cause de leur faible coût. Cette addition

minérale se caractérise par une très forte teneur en silice et en alumine et une finesse de mouture élevée par rapport à celle du ciment utilisé et de fillers calcaires.

Les caractéristiques de la pouzzolane sont résumées comme suit :

Forme ..... poudre  
Aspect ..... homogène  
Densité absolue ..... 2,87  
Surface massique ..... 2567 cm<sup>2</sup>/g

### **III.9. Conclusion**

Les essais réalisés, sur les granulats de carrière choisie, ont présenté de bonnes propriétés physiques, qui répondent en général, aux spécifications exigées par la norme P 18-541 et P 18-541. L'utilisation donc de ces granulats présentant de bonnes caractéristiques permettra l'obtention de bons bétons (Catégorie B), satisfaisant les critères de maniabilité, de résistances et de durabilité.

Les résultats des essais d'étalement au mini cône et d'écoulement au cône de Marsh montrent que la pâte est saturée en superplastifiant pour un dosage moyen de l'ordre 0.5% pour le premier superplastifiant (Granitex). Cependant le dosage de saturation moyen du deuxième superplastifiant (Glenium 26) est de l'ordre de 0,65%, et enfin, pour le troisième superplastifiant (Superior RM), la pâte est saturée pour un dosage moyen de l'ordre de 0,5%.

## Références bibliographiques

- **BARKAT A.**, 2006 : Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton, Mémoire de magister, l'université KASDI MERBAH Ouargla, Algérie.
- **BOUKLI HACENE S. M. A.**, 2010 : Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de TLEMCCEN, thèse de Doctorat à l'Université de Tlemcen. Algérie.
- **Hallal A., Ezziane K., Kadri A.**, 2011 : Fluidité des coulis de ciments composites avec additions minérales locales en fonction des superplastifiants de granitex, Séminaire International, INNOVATION & VALORISATION EN GENIE CIVIL & MATERIAUX DE CONSTRUCTION, N° : 10-148, UHBB Chlef, Algérie.

---

# **CHAPITRE IV**

## **Partie expérimentale**

---

## IV.1. Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse dans un premier temps, à la confection des différents bétons, ensuite, aux essais sur bétons, permettant ainsi de caractériser leurs performances physiques et mécaniques et d'évaluer le comportement des BAP par rapport aux bétons traditionnels vibrés.

Pour cela, on a choisi de faire varier quelques paramètres tels que, la nature des fines (filler de calcaire, pouzzolane) et le type d'adjuvant, pour un même type de matériaux (ciment, eau granulats).

L'étape de formulation consiste à choisir une proportion optimale et bien précise des différents constituants pour réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction de l'ouvrage.

## IV.2. Programme expérimental



Notre étude expérimentale est divisée en deux parties :

### ❖ Béton ordinaire

On vu de connaître l'influence des additions minérales et des adjuvants sur les propriétés à l'état frais et durci des bétons ordinaires, un programme expérimental a été arrêté. Différents pourcentages de substitution et variation de dosage de saturation des adjuvants ont été effectués sur un béton témoin, réalisé par **Boukli Hacene, 2010**, (tableau IV.1). Les substitutions effectuées sont les suivantes :

- ✓ Substitutions de 10%, 20% et 30% de la masse du ciment par les fillers calcaires.
- ✓ Substitutions de 10% et 20% de la masse du ciment par la pouzzolane.
- ✓ Toutes ces substitutions sont effectuées avec les dosages de saturation des trois adjuvants (GRANITEX, SURERIOR RM 34, GLENIUM26).
- ✓ Les formulations ont été obtenues par la méthode de DREUX-GORISSE.

**Tableau IV.1.**Composition du béton ordinaire (**Boukli Hacene, 2010**).

Ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Sable (Kg/m <sup>3</sup> )	Gravier 4/8 (Kg/m <sup>3</sup> )	Gravier 8/16 (Kg/m <sup>3</sup> )	Gravier 16/20 (Kg/m <sup>3</sup> )	EAU (Kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{E}{C}$	$\frac{G}{S}$	Affaissement (cm)
350	660	144	432	533	175	0.5	1.7	5

Toutes les formulations avec les différents pourcentages de substitutions, les différents pourcentages d'adjuvants, ainsi que tous les résultats des essais de caractérisation de ces bétons à l'état frais et durci sont représentées dans **l'annexe 1**.

### ❖ **Béton autoplaçant**

Afin de connaître l'influence des additions minérales et des adjuvants sur les propriétés à l'état frais et durci des bétons autoplaçants, un programme expérimental a été arrêté. Une série de bétons ont été formulés avec différents pourcentages de substitution de ciment par les additions. Les substitutions effectuées sont les suivantes :

- ✓ Substitutions de 10%, 20%, 30%, 40% et 50% de la masse du ciment par les fillers calcaires.
- ✓ Substitutions de 10%, 20%, 30%, 40% et 50% de la masse du ciment par la pouzzolane.
- ✓ Toutes ces substitutions sont effectuées avec un seul adjuvant (TEK SUPERFLOW 2000 R).

Les formulations ont été obtenues par la méthode chinoise, selon cette méthode la formulation du BAP passe par les étapes suivantes :

#### **Etape 1: Détermination du facteur de compacité « PF »**

La combinaison massique de 33% du gravier 4/8 et 67% du gravier 8/16 nous a permis d'obtenir le meilleur arrangement. Raison pour laquelle nous avons opté de choisir cette combinaison pour déterminer le PF.

A partir des essais réalisés, la valeur optimale du facteur de compacité « PF » est de **1,12**.

Elle a été obtenue pour les masses volumiques correspondantes au rapport G/S égal à 1 ( $S/G+S = 50\%$ ). Ce rapport est en adéquation avec les recommandations du l'AFGC. Par ailleurs le rapport G 4/8/ G 8/16 est de 0,5.

#### **Etape 2: Détermination du dosage en granulats**

Les masses des graviers et du sable sont déduites respectivement à partir des équations **II.1** et **II.2**. Pour le rapport G/S égale 1, nous avons obtenu pour le sable et les graviers une masse de  $810 \text{ Kg/m}^3$  respectivement.

### **Etape 3: Détermination du dosage minimal en ciment et du rapport $E_{eff}/L_{équi}$**

Le dosage minimal du liant équivalent ( $L_{équi}$ ) et le rapport  $E_{eff}/L_{équi}$  maximal sont choisis en fonction de la classe d'exposition et ceci conformément à la norme NF EN206-1.

Dans notre étude nous avons choisi de formuler un BAP pour la classe d'environnement très agressif (XA) qui nécessite une teneur en liant équivalent très élevée de  $350 \text{ kg/m}^3$ .

Le dosage en ciment est déduit par la formule **I.1**.

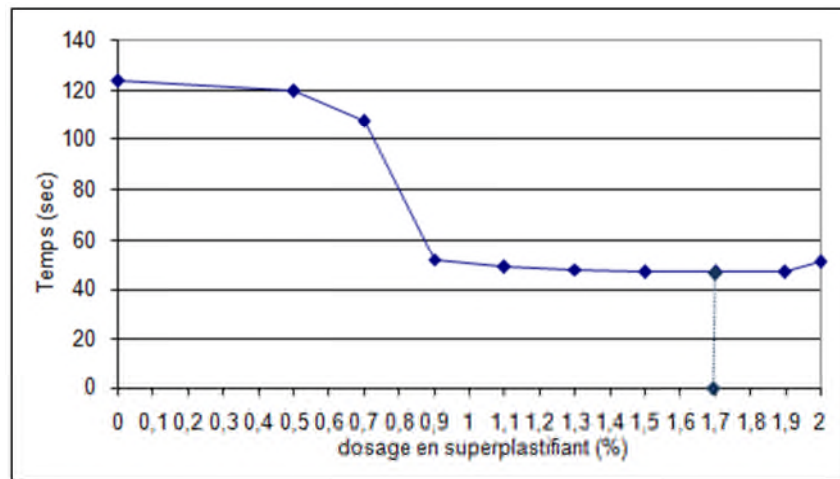
Puisque le ciment utilisé est du type CEM II donc  $k=0$ , et la teneur en liant équivalent serait égale à celle du ciment donc  $C= 350 \text{ kg/m}^3$ . Cette classe d'exposition exige un rapport  $E_{eff}/L_{équi} = 0,5$ .

### **Etape 4: Détermination du rapport E/F et E/P**

Le rapport E/F et E/P est déterminé de telle façon que la fluidité de la pâte des fillers et des pouzzolanes est identique à celle de la pâte pure du ciment pour un rapport  $E/C=0,5$ . Nous avons trouvé qu'un rapport E/F égal 0,42 et un rapport E/P égale 0.45 permettent de répondre à notre objectif.

### **Etape 5: Dosage de saturation**

Les travaux de **Taleb (2009)** montrent que la pâte est saturée en superplastifiant pour un dosage de l'ordre 1.7%.



**Figure IV.1.** Variation du temps d'écoulement du coulis en fonction du dosage en superplastifiant (**Taleb, 2009**).



### **Etape 6: Dosage en fillers calcaires**

La masse du filler est calculée selon la démarche suivante:

$$V_{\text{pâte fillers}} = 1 - V_g - V_s - V_c - V_E - V_a \quad (\text{IV.1})$$

$$V_{\text{pâte fillers}} = 1 - \frac{M_g}{1000 \times G_g} - \frac{M_s}{1000 \times G_s} - \frac{M_c}{1000 \times G_c} - \frac{M_{ec}}{1000 \times G_e} - V_a \quad (\text{IV.2})$$

En outre :

$$V_{\text{pâte fillers}} = V_F + V_{EF} \quad (\text{IV.3})$$

$$V_{\text{pâte fillers}} = \frac{M_f}{1000 \times G_f} + \frac{E_f}{1000} \quad (\text{IV.4})$$

Par ailleurs, l'équation IV.4 devient :

$$V_{\text{pâte fillers}} = \frac{M_f}{1000 \times G_f} \left( 1 + \frac{E}{F} \times G_f \right) \quad (\text{IV.5})$$

Pour la même démarche nous avons calculé le dosage en pouzzolane. Nous avons trouvé un dosage en filler égale à  $110 \text{ Kg/m}^3$  et un dosage en pouzzolane égale à  $101.5 \text{ Kg/m}^3$ .

### **Etape 7: Dosage en eau**

La quantité d'eau de gâchage du BAP étudié est la quantité d'eau nécessaire pour le ciment et les fillers ou la pouzzolane plus la quantité d'eau absorbée par les granulats moins la quantité d'eau apportée par le SP.

$$E_T = E_C + E_F + E_G + E_S + E_{SP} \quad (\text{IV.6})$$

Nous avons obtenu un dosage en eau égale à  $210 \text{ Kg/m}^3$ .

Il est plus qu'important de vérifier les caractéristiques du BAP à l'état frais à travers des essais (étalement, U – Box, V – funnel, ...) avant de valider la formulation.

Les **Tableaux IV.2** et **IV.4** regroupent les formulations de référence de notre étude.

**Tableau IV.2.**Composition du BAP de référence (à base de filler) pour 1m<sup>3</sup>.

Le rapport $\frac{G}{S}$	1			
Le rapport $\frac{E}{C}$	0.5			
Le rapport $\frac{E}{F}$	0.42			
Le dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	350			
Le dosage en fillers (kg/m <sup>3</sup> )	110			
Le dosage en gravier (kg/m <sup>3</sup> )	810	33%	Gravier 4/8	270
		67%	Gravier 8/16	540
Le dosage en sable (kg/m <sup>3</sup> )	810			
Le dosage en SP (kg/m <sup>3</sup> )	7.82			
Le dosage en eau (kg/m <sup>3</sup> )	210			

- ✓ Afin d'étudier l'influence du dosage en fillers calcaires sur les propriétés du BAP à l'état frais et à l'état durci, nous avons confectionné en se basant sur la formulation de référence plusieurs bétons en faisant varier le dosage en fillers entre 0% et 50%. Les compositions sont regroupées dans le **Tableau IV.3**.

**Tableau IV.3.**Composition du BAP pour les différents pourcentages en filler calcaires.

Fillers calcaires (%)	0	10	20	30	40	50
Le dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	460	414	368	322	276	230
Le dosage en fillers (kg/m <sup>3</sup> )	0	46	92	138	184	230
Le dosage en gravier (kg/m <sup>3</sup> )	810	810	810	810	810	810
Le dosage en sable (kg/m <sup>3</sup> )	810	810	810	810	810	810
Le dosage en SP (kg/m <sup>3</sup> )	7.82	7.82	7.82	7.82	7.82	7.82
Le dosage en eau (kg/m <sup>3</sup> )	210	210	210	210	210	210

**Tableau IV.4.**Composition du BAP de référence (à base de pouzzolane) pour 1m<sup>3</sup>.

Le rapport $\frac{G}{S}$	1			
Le rapport $\frac{E}{C}$	0.5			
Le rapport $\frac{E}{P}$	0.45			
Le dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	350			
Le dosage en pouzzolane (kg/m <sup>3</sup> )	101.5			
Le dosage en gravier (kg/m <sup>3</sup> )	810	33%	Gravier 4/8	270
		67%	Gravier 8/16	540
Le dosage en sable (kg/m <sup>3</sup> )	810			
Le dosage en SP (kg/m <sup>3</sup> )	7.67			
Le dosage en eau (kg/m <sup>3</sup> )	210			

- ✓ Afin d'étudier l'influence du dosage en pouzzolane sur les propriétés du BAP à l'état frais et à l'état durci, nous avons confectionné en se basant sur la formulation de référence plusieurs bétons en faisant varier le dosage en pouzzolane entre 0% et 50%. Les compositions réalisées sont regroupées dans le **Tableau IV.5**.

**Tableau IV.5.**Composition du BAP pour les différents pourcentages en pouzzolane.

pouzzolane (%)	0	10	20	30	40	50
Le dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	451.5	406.35	361.2	316.05	270.9	225.75
Le dosage en fillers (kg/m <sup>3</sup> )	0	45.15	90.3	135.45	180.6	225.75
Le dosage en gravier (kg/m <sup>3</sup> )	810	810	810	810	810	810
Le dosage en sable (kg/m <sup>3</sup> )	810	810	810	810	810	810
Le dosage en SP (kg/m <sup>3</sup> )	7.67	7.67	7.67	7.67	7.67	7.67
Le dosage en eau (kg/m <sup>3</sup> )	210	210	210	210	210	210

### IV.3. Confection du béton

Le malaxeur utilisé pour la confection des bétons est à axe vertical avec une capacité de 60 litre (**figure IV.2**). La séquence de malaxage retenue est la suivante :

- ✓ Pesée les quantités nécessaires des constituants pour un mélange.

- ✓ Introduction des constituants granulaires dans le malaxeur qui doit être pré humidifié avec 10% de l'eau de gâchage, en commençant par les graviers du plus gros jusqu'à le plus fins.
- ✓ Introduction du ciment, des fines et du sable.
- ✓ Le malaxage à sec pendant une minute.
- ✓ Introduction de 1/3 de l'eau sans adjuvant avec malaxage pendant 30 secondes.
- ✓ Introduction des 2/3 de l'eau avec l'adjuvant et un malaxage pendant 1mn 30 pour les bétons ordinaires et 2 mn 30 pour les bétons autoplaçants.
- ✓ Le temps total de malaxage est de 3 minutes pour les bétons ordinaires et de 4 minutes pour les BAP.



**Figure IV.2.**Malaxeur de béton.

## **IV.4. Confection des éprouvettes**

### **IV.4.1. Remplissage des moules**

Une fois le malaxage terminé, nous versons au moyen d'une main écope le béton dans des moules cylindriques 11× 22cm qui doivent être bien graissés afin de faciliter le décoffrage.

### **IV.4.2. Mise en place du béton**

Pour les bétons ordinaires, le choix du mode de mise en place dépend de la consistance du béton mesurée par l'essai d'affaissement :

-si l'affaissement mesuré  $\leq$  à 9, la mise en place du béton en deux couches avec la table vibrante et ceci conformément à la norme NF P 18-422.

- si l'affaissement mesuré  $\geq$  à 10, la mise en place du béton en deux couches avec piquage à raison de 10 coups par couche, conformément à la norme NF P 18-423.

Par contre pour les bétons autoplaçants le remplissage des éprouvettes est effectué sans vibration. À la fin du coulage, il faut araser les éprouvettes à l'aide d'une truelle.

#### IV.4.3. Conservation des éprouvettes

- Conservation avant démoulage

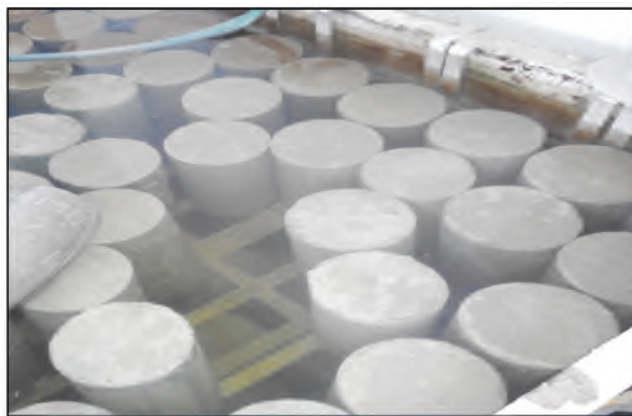
Après la mise en place du béton, les éprouvettes sont conservées dans leurs moules à l'intérieur du laboratoire (**figure IV.3**) et sont démoulées après 24 heures.



**Figure IV.3.**Éprouvettes à l'état frais.

- Conservation après démoulage

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé un seul mode de conservation du béton. Les éprouvettes ont été totalement immergées dans l'eau à une température ambiante de  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ , ceci permet d'éviter les pertes d'eau afin de garantir l'hydratation du ciment jusqu'à l'échéance déterminée (**figure IV.4**).



**Figure IV.4.**Conservation des éprouvettes.



## IV.5. Caractérisation du béton à l'état frais

### IV.5.1. Caractérisation du béton ordinaire à l'état frais

Pour chaque formulation étudiée, nous avons caractérisé le **béton ordinaire** par les essais suivants :

#### IV.5.1.1. L'essai d'affaissement

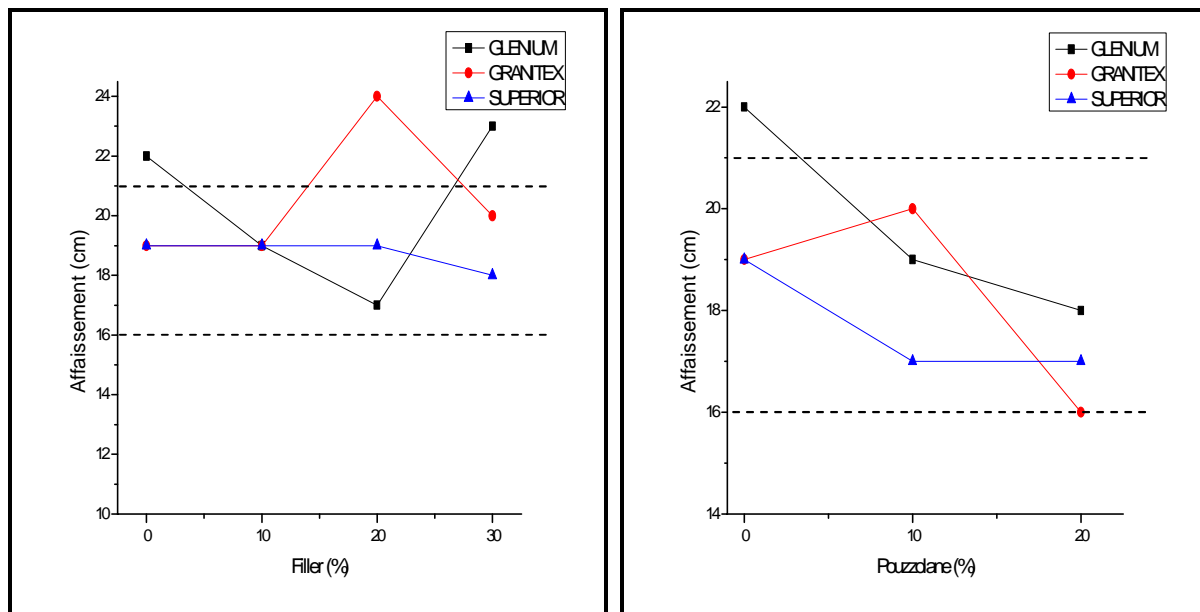
Après le gâchage, nous mesurons l'affaissement au cône d'Abrams selon la norme P18-451.

La **figure IV.5** présente une photo de cet essai permettant d'avoir la consistance du béton.



**Figure IV.5.** Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams.

Les résultats de cet essai sont présentés sur la figure suivante:



**Figure IV.6.** Affaissement des BO en fonctions du pourcentage de filler et de pouzzolane.

La **figure IV.6** montre l'effet bénéfique des adjuvants sur la fluidité des mélanges. Nous remarquons que, pour les différentes substitutions et pour les trois types d'adjuvants utilisés, la majorité des bétons obtenus sont des bétons fluides ( $16 \leq \text{Affaissement} \leq 21 \text{ cm}$ ) dont les affaissements sont largement supérieurs à celui du béton de référence.

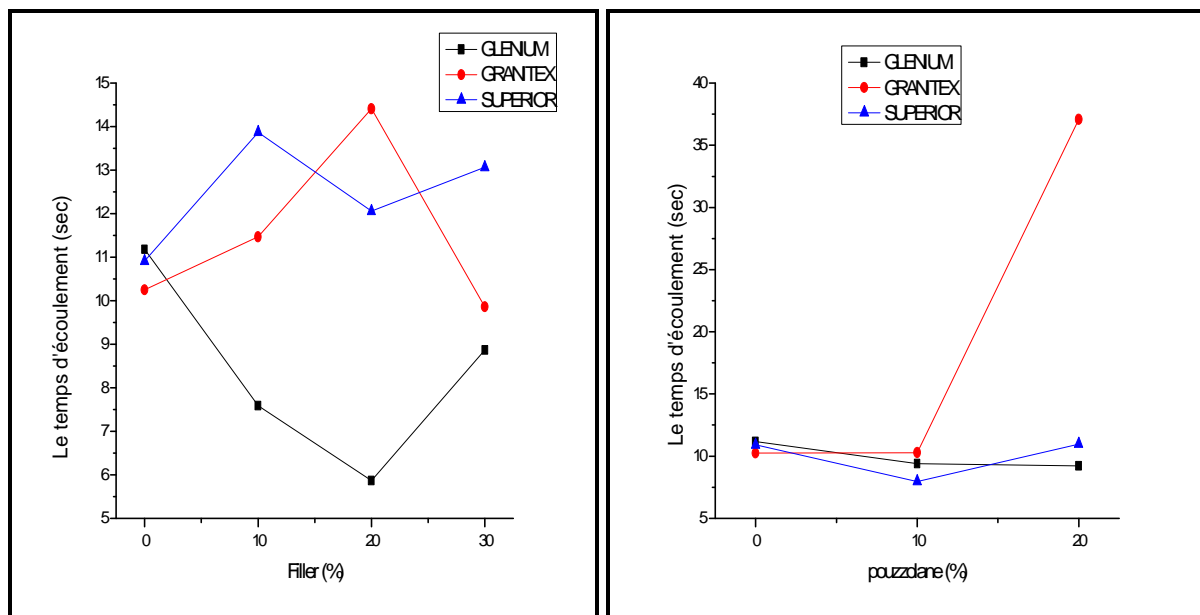
#### IV.5.1.2. L'essai V- funnel

Cet essai est réalisé pour déterminer le temps d'écoulement et pour caractériser la viscosité des bétons confectionnés (**figure IV.7**).



**Figure IV.7.**L'essai de V-Funnel.

Les résultats de cet essai sont présentés sur la figure suivante:



**Figure IV.8.**Le temps d'écoulement des BO en fonctions du pourcentage de filler et de pouzzolane.



La **figure IV.8** montre que, les trois adjuvants ont donnés presque le même temps d'écoulement (compris entre 7 et 11sec) et cela pour toutes les substitutions du ciment par la pouzzolane, à l'exception de celui obtenu par l'adjuvant Granitex et pour une substitution de 20% de pouzzolane qui est de 37sec. Nous remarquons aussi que pour les trois adjuvants, tous les bétons obtenu par les substitutions du ciment par les fillers calcaires ont donné un temps d'écoulement compris entre 5.87 et 14.41sec.

#### **IV.5.2. Caractérisation du béton autoplaçant à l'état frais**

Pour chaque formulation étudiée, nous avons caractérisé le **béton autoplaçant** par les essais recommandés par l'AFGC et les résultats obtenus de ces essais sont rassemblés dans **l'annexe 2**.

##### **IV.5.2.1. Essai d'étalement**

Cet essai est utilisé pour caractériser la fluidité du béton autoplaçant en milieu non confiné. Le principe de cet essai est de mesurer le diamètre d'une galette du béton (moyenne de deux diamètres orthogonaux) après soulèvement du cône d'Abrams (**figure IV.9**).

Il faut rappeler qu'est considéré comme autoplaçant, un béton qui forme une galette d'un diamètre compris entre 60 et 75 cm (AFGC, 2002).

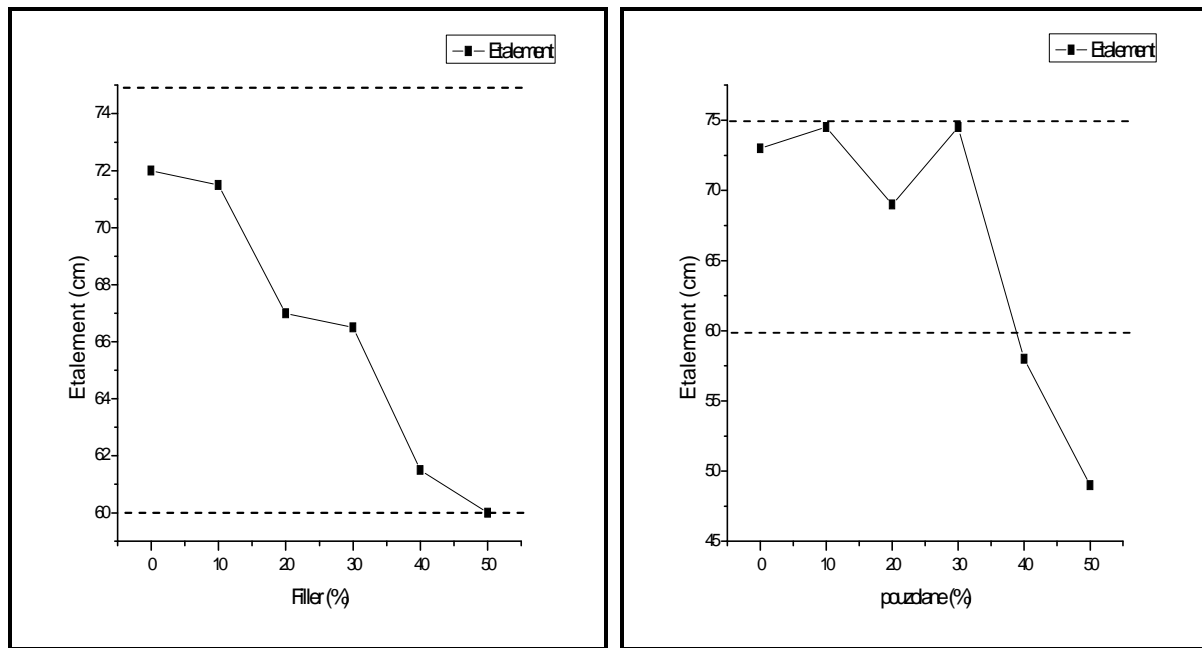


**Figure IV.9.**L'essai d'étalement au cône d'Abrams.

Lors de l'essai d'étalement on mesure le temps  $T_{500}$  nécessaire à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre après le soulèvement du cône d'Abrams. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du béton.



Les résultats obtenus de l'essai d'étalement sont représentés sur la figure suivante:



**Figure IV.10.** Etalement des BAP en fonction du pourcentage de filler et de pouzzolane.

Les résultats issus des essais au cône d'Abrams (**figure IV.10**) montrent l'effet bénéfique du superplastifiant sur la fluidité des mélanges. Nous constatons que les bétons autoplaçants étudiés à base de fillers calcaires respectent le critère d'étalement (compris entre 60 et 75 cm). Nous remarquons aussi qu'il est possible de formuler des BAP dosé à  $230 \text{ kg/m}^3$  en ciment (réduction de 50% de la quantité de ciment). Cela permet de réduire considérablement le coût du mélange tout en ayant un comportement à l'état frais meilleur que celui d'un béton ordinaire. Toutefois, plus le dosage en pouzzolane augmente, l'étalement est fortement diminué jusqu'à la valeur de 49 cm, ce qui implique que la pouzzolane absorbe une quantité élevée d'eau, ce qui réduit beaucoup l'ouvrabilité du béton.

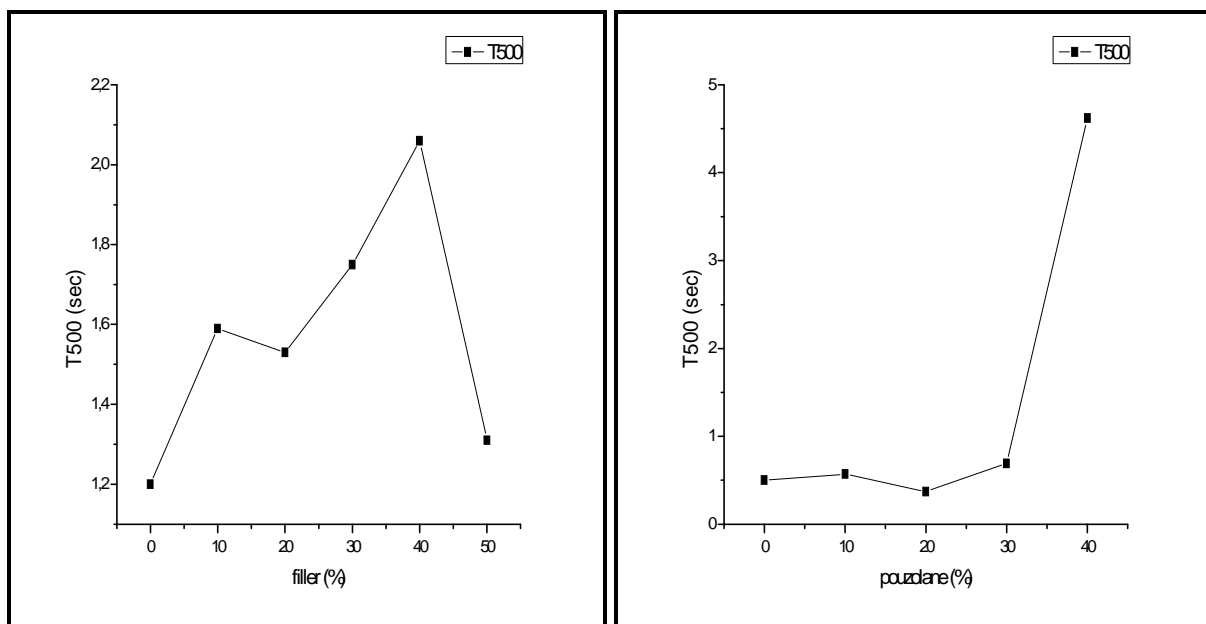
Nous constatons aussi que les bétons autoplaçants étudiés à base de pouzzolane respectent le critère d'étalement pour des substitutions inférieures à 35%. Par contre pour une substitution de 40% et 50% de Pouzzolane les bétons autoplaçants ne respectent pas les recommandations (étalements inférieurs à 60 cm), et plus particulièrement le béton qui contient 50% de pouzzolane qui présente un étalement inférieur à 50 cm. Par ailleurs, le béton risque de présenter une déformabilité insuffisante pour pouvoir passer à travers les zones fortement ferrillées.

On a pu observer aussi que l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de bétons était absente ou très faible. De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncèles au milieu des galettes du béton.

Nous remarquons aussi qu'il est possible de formuler des BAP à base de pouzzolane dosés à  $322 \text{ kg/m}^3$  en ciment (réduction de 30% de la quantité de ciment). Cela permet de réduire considérablement le coût du mélange tout en ayant un comportement à l'état frais meilleur que celui d'un béton ordinaire.

Lors de l'essai d'étalement on mesure le temps  $T_{500}$  nécessaire à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre après le soulèvement du cône d'Abrams. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du béton.

Les résultats obtenus, concernant le temps d'étalement  $T_{500}$  sont représentés sur la figure suivante:



**Figure IV.11.**Le temps d'étalement  $T_{500}$  des BAP en fonction du pourcentage en fillers et en pouzzolane.

Pour une substitution de 0%, 10%, 20% et jusqu'à 30% du ciment par la pouzzolane, les temps  $T_{500}$  sont plus petits que ceux obtenus pour les mêmes substitutions avec les fillers calcaires. Les temps  $T_{500}$  obtenus pour les bétons à base de pouzzolane sont inférieurs à 1 sec, ce qui montre que la viscosité de ces bétons est faible et donc une meilleure fluidité.

Les résultats obtenus par la mesure de  $T_{500}$  sont complètement conformes à ceux de l'étalement.

#### **IV.5.2.2. Essai de la boîte en « L »**

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

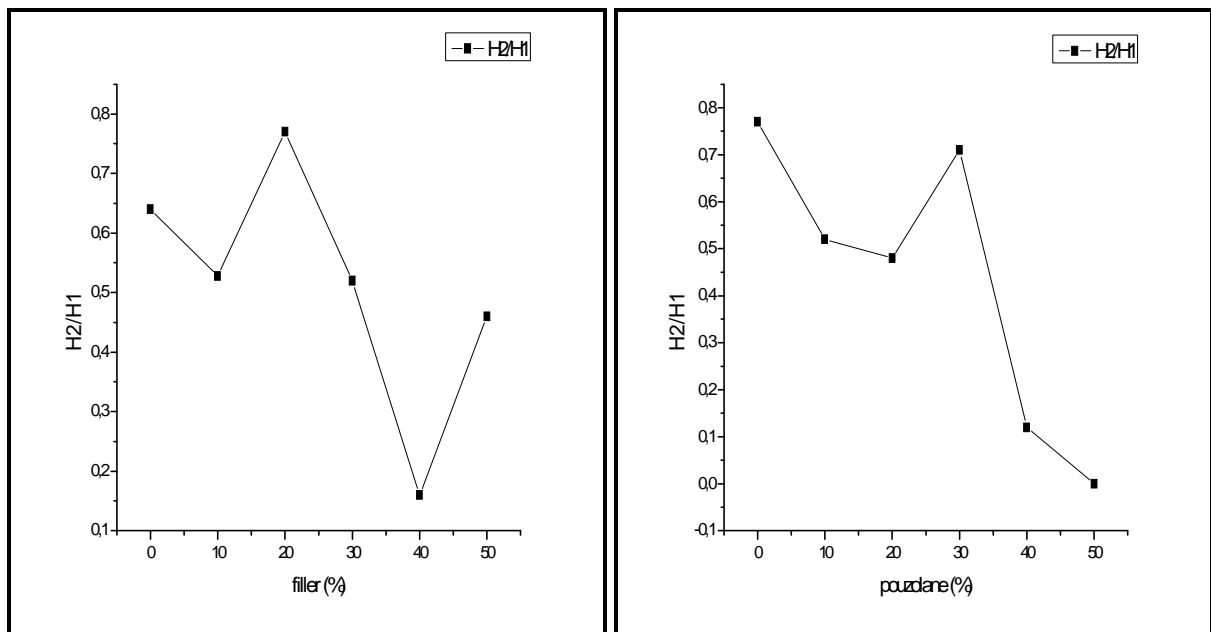
Le principe de cet essai, est de remplir entièrement la partie verticale de la boîte (13 litres), laisser le béton reposer pendant 1 minute puis enlever la trappe et permettre au béton de s'écouler dans la partie horizontale à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, on mesure  $H_2$  et  $H_1$  et le résultat est exprimé en termes de taux de remplissage  $H_2/H_1$ .

Nous avons utilisé une boîte avec trois barres. Nous notons que les distances entre les barres d'aciers représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrillés.



**Figure IV.12.**L'essai de la boit en L.

Les résultats obtenus de cet essai sont représentés sur la figure suivante:



**Figure IV.13.**Le taux de remplissage des BAP en fonction du pourcentage de filler et de pouzzolane.

D'après la **figure IV.13**, nous remarquons que la capacité de remplissage requise pour la majorité des BAP n'est pas atteinte, elle doit normalement dépasser les 80% selon les recommandations de l'**AFGC, 2002**. Les résultats obtenus pour 20% de fillers, 0% et 30% de pouzzolane sont sensiblement proches des 80% recommandées, ce qui est satisfaisant. Mais il est aussi important de noter que la combinaison du ferrailage utilisée dans la boîte en L dans nos essais est celle utilisée lorsque le béton est formulé pour les ouvrages avec une densité importante en ferrailage (3 barres  $\phi$  14 mm espacées de 39 mm).

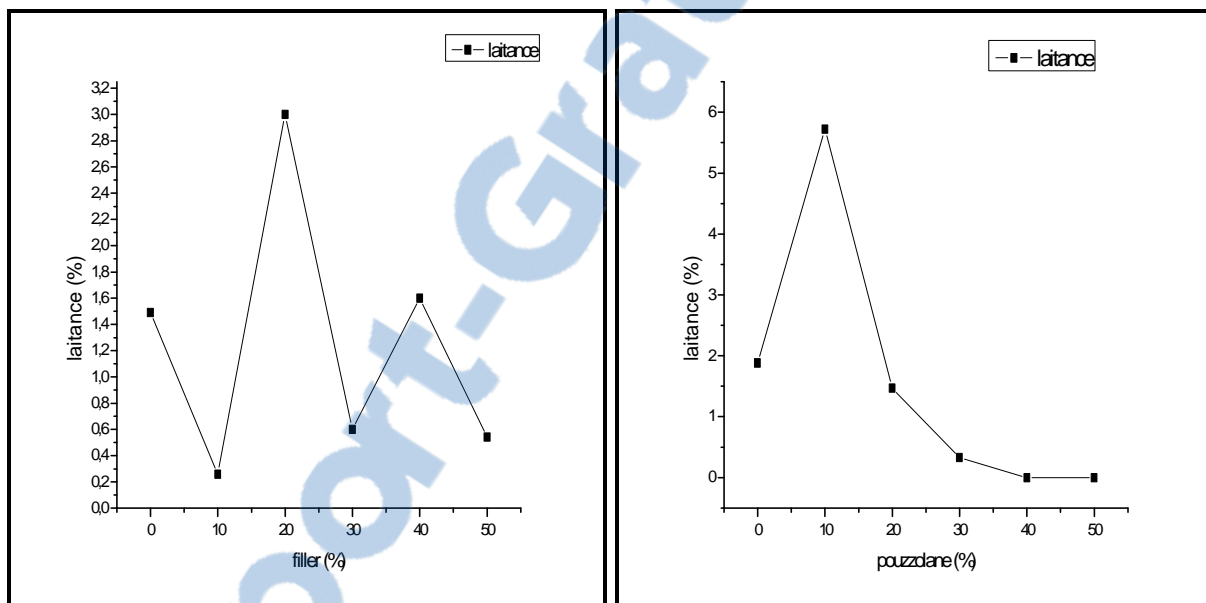
#### **IV.5.2.3. Essai de stabilité au tamis**

Il consiste à mesurer la proportion d'éléments fins du béton (laitance) passant au travers d'un tamis de 5 mm (**figure IV.14**) pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de déterminer si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. On considère qu'une valeur inférieure à 15% de laitance est une caractéristique d'un béton stable (**AFGC, 2002**).



**Figure IV.14.**L'essai de stabilité au tamis.

Les résultats obtenus de cet essai sont représentés sur la figure suivante:



**Figure IV.15.**Pourcentage de laitance des BAP en fonction du pourcentage de filler et de pouzzolane.

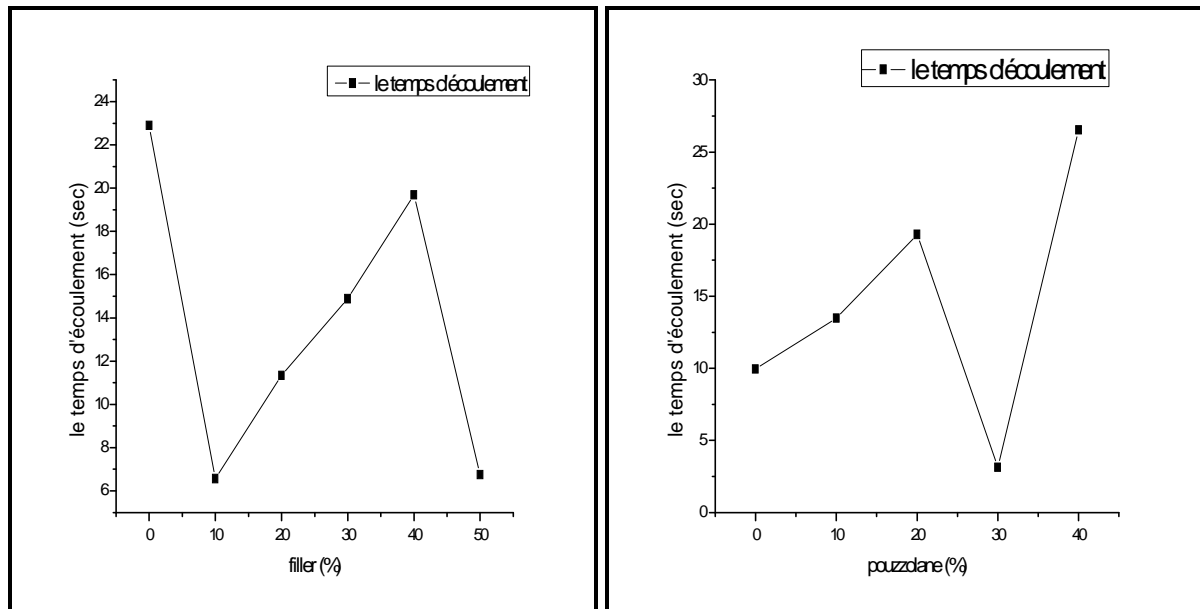
La **figure IV.15** montre que tous nos bétons ont présentés une bonne stabilité au tamis, pas de ségrégation statique. En effet, le taux de ségrégation est situé dans le domaine des BAP ( $0\% \leq P_{\text{laitance}} \leq 15\%$ ). Par contre les résultats obtenus pour cet essai avec la variation de fillers sont incohérents.

#### IV.5.2.4. L'essai d'écoulement à l'entonnoir en V « V-Funnel »

Cet essai consiste à mettre une quantité de béton frais dans l'entonnoir en forme de « V » (**figure IV.7**), le temps d'écoulement est déterminé suivant une procédure très simple : c'est

le temps mesuré à partir de l'ouverture de l'orifice jusqu'à l'écoulement total du béton. Cet essai permet aussi d'évaluer la stabilité et la viscosité du béton lors de l'écoulement.

Les résultats obtenus de cet essai sont représentés sur la figure suivante:



**Figure IV.16.** Le temps d'écoulement des BAP en fonction du pourcentage de filler et de pouzzolane.

La **figure IV.16** montre que, les BAP qui ont répondu aux recommandations (**EFNARC, 2000**) sont ceux obtenus pour des substitutions en fillers de 10% et 20% et 50% ainsi que ceux pour des substitutions en pouzzolane de 0% et 30%, avec un temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir compris entre 5 et 12 secondes.

## IV.6. Caractérisation du béton à l'état durci

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude.

### IV.6.1. Surfaçage des faces de chargement (NF P 18-416)

Pour assurer la planéité des faces de chargement le jour des écrasements, nous avons procédé à un surfaçage des éprouvettes à l'aide du soufre normalisé. Vu son adhérence au béton et aussi sa résistance à la compression, cette matière donne généralement satisfaction.

Pour les éprouvettes sortant de l'eau, nous avons procédé à un essuyage préalable avant de les surfaçer pour éviter le décollement du surfaçage.

La **figure IV.17** présente une photo de deux éprouvettes avec un surfaçage des deux faces.



**Figure IV.17.** Deux éprouvettes après surfaçage.

#### **IV.6.2. Essai de résistance à la compression (NF P 18-406)**

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture (**figure IV.18**).

La conduite de l'essai est la suivante : après le surfaçage, l'éprouvette doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge (vitesse de montée de la charge constante) doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de  $\pm 0.2$  MPa. Au moment de la rupture, la machine s'arrête et on lit alors la charge de rupture.

Les valeurs des résistances mécaniques des bétons ordinaires et des BAP sont résumés dans les **annexes 1 et 2**.



Figure IV.18. Essai de compression.

#### IV.6.3. Caractérisation du béton ordinaire à l'état durci

Les valeurs des résistances à la compression des bétons ordinaires sont représentées sur la figure suivante:

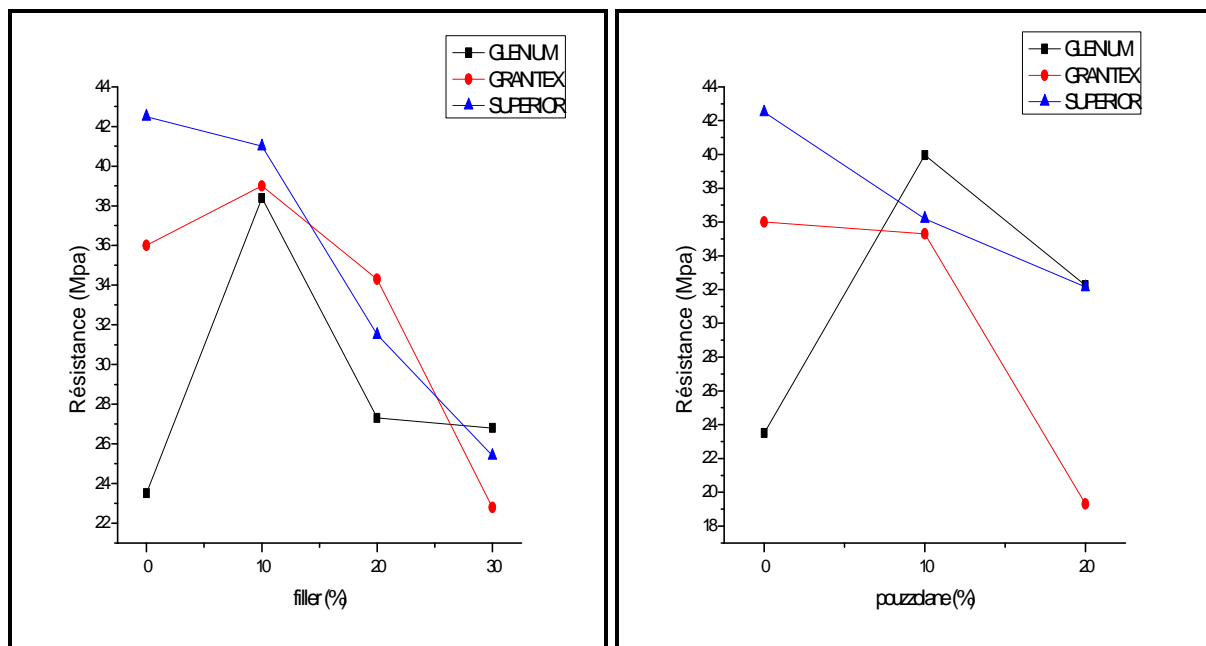


Figure IV.19. La résistance des BO en fonction du pourcentage de filler et de puzzolane.

Les résultats de la **figure IV.19** montrent que la résistance à la compression a tendance, en général, à diminuer en augmentant le taux de substitution et cela pour les trois types d'adjuvants utilisés. Cette substitution partielle du ciment par des fillers calcaires ou la puzzolane a un effet positif sur les propriétés rhéologiques de la pâte. Si le critère de

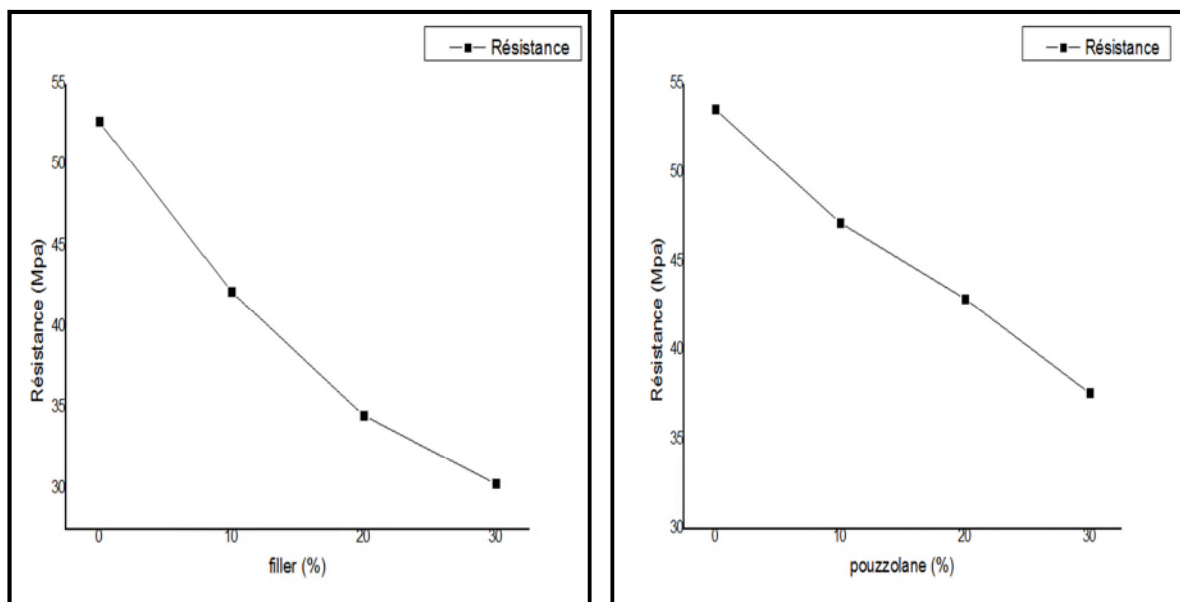


résistance est imposé, un dosage maximal de 10 % et de fillers ou de 10% de pouzzolane peut être suffisant (résistances à la compression supérieures à 35 MPa).

Nous avons aussi constaté qu'avec les trois adjuvants utilisés et pour les pourcentages en fillers calcaires de 10% et 20% et le pourcentage en pouzzolane de 10% nous avons pu obtenir des bétons ordinaires avec des résistances à la compression supérieures à 25 MPa (valeur exigée par l'Organisme National Algérien de Contrôle Technique de la Construction (CTC)).

#### IV.6.4. Caractérisation du béton autoplaçant à l'état durci

Les valeurs des résistances à la compression des bétons autoplaçants sont représentées sur la figure suivante:



**Figure IV.20.** La résistance des BAP en fonction du pourcentage de filler et de pouzzolane.

Les résultats de la **figure IV.20** montrent que la résistance a tendance à diminuer en augmentant le taux de substitution. Cette substitution partielle du ciment par des fillers calcaires et par la pouzzolane a un effet positif sur les propriétés rhéologiques de la pâte.

Nous avons aussi constaté qu'avec le superplastifiant « SUPERFLOW 2000 R » et pour les pourcentages en fillers calcaires et en pouzzolane de 0%, 10%, 20% et 30% nous avons pu obtenir des bétons autoplaçants avec des résistances à la compression supérieures à 25 MPa (valeur exigée par l'Organisme National Algérien de Contrôle Technique de la Construction (CTC)).

## IV.7. Conclusion

Cette étude nous a permis dans un premier temps de formuler des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants et de faire le point sur l'influence des adjuvants, des fillers calcaires et de la pouzzolane sur les propriétés des bétons ordinaires et autoplaçants à l'état frais et durci.

- ✓ L'utilisation des adjuvants et l'incorporation des fillers calcaires ou de la pouzzolane dans la formulation des bétons ordinaires à un effet bénéfique non seulement sur le comportement des bétons à l'état frais mais aussi sur la résistance mécanique.
- ✓ La caractérisation des bétons formulés par la méthode chinoise a permis d'évaluer l'efficacité et la faisabilité de cette méthode car les résultats obtenus répondent aux recommandations de l'AFGC.
- ✓ L'incorporation des fillers calcaires dans la formulation des bétons autoplaçants a un effet positif non seulement sur le comportement des bétons à l'état frais mais aussi sur la résistance mécanique.
- ✓ Concernant le superplastifiant que nous avons utilisé pour formuler nos bétons autoplaçants, nos résultats ont abouti à conclure que ce superplastifiant « SUPERFLOW 2000 R » offre aux bétons de bonnes performances rhéologiques.
- ✓ L'incorporation des fillers calcaires ou de la pouzzolane à la formulation du béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût de ce dernier. Par ailleurs, elle contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO<sub>2</sub> de l'industrie cimentière dans La nature .

## Références bibliographiques

- **Association française de Génie Civil (AFGC)**, Bétons Auto-Plaçants  
Recommandations provisoires, juillet 2002, 63 pages.
- **BOUKLI HACENE S. M. A.**, 2010 : Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de TLEMCCEN, thèse de Doctorat à l'Université de Tlemcen. Algérie.
- **Taleb O.**, 2009 : Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux, mémoire de magister de l'université de Tlemcen, Algérie.
- **EFNARC**, (2000), « Specification and guidelines for Self-Compacting Concrete »  
EFNARC, février 2002. Source, <http://efnarc.org>. 2000, p32.

# CONCLUSION GENERALE

Notre étude a pour objectif d'étudier l'influence des fillers calcaires et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés rhéologique et mécanique des bétons ordinaires et autoplaçants formulés avec différents types d'adjuvants.

Pour cela, nous avons utilisé la méthode de Dreux Gorisse pour la formulation des bétons ordinaires et une approche de formulation connue sous l'appellation de « la méthode chinoise » pour les BAP.

Après avoir effectué tous les essais sur les constituants du béton ainsi que ceux sur le béton à l'état frais et à l'état durci, nous avons tiré les enseignements suivants :

A partir de la recherche bibliographique, nous avons remarqué qu'il est nécessaire d'attacher une importance particulière à l'influence de chaque paramètre afin d'aboutir à une formulation optimale et d'atteindre au mieux les caractéristiques recherchées.

Les résultats obtenus montrent l'effet bénéfique des adjuvants et de ces types d'additions non seulement sur le comportement des bétons ordinaires à l'état frais mais aussi sur la résistance à la compression.

Nous remarquons aussi qu'il est possible de formuler des BAP à base des fillers dosé à 230 kg/m<sup>3</sup> en ciment (réduction de 50% de la quantité de ciment), ainsi qu'il est possible de formuler des BAP à base de pouzzolane dosés à 322 kg/m<sup>3</sup> en ciment (réduction de 30% de la quantité de ciment). Cela permet de réduire considérablement le coût du mélange tout en ayant un comportement à l'état frais meilleur que celui d'un béton ordinaire.

L'incorporation des fillers calcaires et de la pouzzolane dans la formulation des bétons autoplaçants a un effet positif non seulement sur le comportement des bétons à l'état frais mais aussi sur la résistance mécanique.

Il a été démontré que le superplastifiant « SUPERFLOW 2000 R » offre aux bétons de bonnes performances rhéologiques et donne un gain de résistance.

Les résultats obtenus dans cette étude, montrent que l'utilisation des ressources locales et la substitution d'une partie du ciment par les fillers calcaires ou par la pouzzolane naturelle à des avantages sur le comportement des BAP, notamment la résistance à la compression. Cela,

contribue à réduire le coût du béton et par ailleurs, réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO<sub>2</sub> de l'industrie cimentière dans la nature .

### **Perspectives :**

Il serait aussi intéressant de conduire les mêmes études sur d'autres types de matériaux (d'autres sources de granulats, de ciment ainsi que l'utilisation d'autres types d'adjuvants et d'additions) pour une plus grande efficacité et économie et aller vers un control rationnel et global de la qualité du béton.

Afin de mieux comprendre les différentes facettes de comportement de ces types de béton, il serait intéressant d'étudier d'autres propriétés à l'état durci telle que la durabilité.

# **ANNEXES**

# ANNEXE 1

**Annexe 1.1.** Composition du béton ordinaire pour les différents pourcentages en fillers calcaires et en pouzzolane et les résultats des essais de caractérisation.

0% FILLER	S	4/8	8/16	16/20	C	F	ADJ	E	Affaissement (cm)	V-funnel (sec)	La résistance Rc (Mpa)
Glenium	660	144	432	533	350	0	2.25	173.5	22	11.18	23.5
Granitex	660	144	432	533	350	0	1.75	173.5	19	10.25	36
Superior	660	144	432	533	350	0	1.75	173.5	19	10.91	42
*											
10% FILLER	S	4/8	8/16	16/20	C	F	ADJ	E	Affaissement (cm)	V-funnel (sec)	La résistance Rc (Mpa)
Glenium	660	144	432	533	315	35	2.25	173.5	19	7.59	38.4
Granitex	660	144	432	533	315	35	1.75	173.5	19	11.47	39
Superior	660	144	432	533	315	35	1.75	173.5	19	13.87	41
*											
20% FILLER	S	4/8	8/16	16/20	C	F	ADJ	E	Affaissement (cm)	V-funnel (sec)	La résistance Rc (Mpa)
Glenium	660	144	432	533	280	70	2.25	173.5	17	5.87	27.3
Granitex	660	144	432	533	280	70	1.75	173.5	24	14.41	34.3
Superior	660	144	432	533	280	70	1.75	173.5	19	12.06	31.5
*											
30% FILLER	S	4/8	8/16	16/20	C	F	ADJ	E	Affaissement (cm)	V-funnel (sec)	La résistance Rc (Mpa)
Glenium	660	144	432	533	245	105	2.25	173.5	23	8.87	26.8
Granitex	660	144	432	533	245	105	1.75	173.5	20	9.86	22.8
Superior	660	144	432	533	245	105	1.75	173.5	18	13.07	25.4
*											
10% pouzzo	S	4/8	8/16	16/20	C	F	ADJ	E	Affaissement (cm)	V-funnel (sec)	La résistance Rc (Mpa)
Glenium	660	144	432	533	315	35	2.25	173.5	19	9.41	39.95
Granitex	660	144	432	533	315	35	1.75	173.5	20	10.29	35.3
Superior	660	144	432	533	315	35	1.75	173.5	17	7.97	36.2
*											
20% pouzzo	S	4/8	8/16	16/20	C	F	ADJ	E	Affaissement (cm)	V-funnel (sec)	La résistance Rc (Mpa)
Glenium	660	144	432	533	280	70	2.25	173.5	18	9.22	32.25
Granitex	660	144	432	533	280	70	1.75	173.5	16	37.10	19.3
Superior	660	144	432	533	280	70	1.75	173.5	17	10.97	32.15
*											
Formulation De base	S	4/8	8/16	16/20	C	F	ADJ	E	Affaissement (cm)	V-funnel (sec)	La résistance Rc (Mpa)
	660	144	432	533	350	0	0	175	5	infinie	44.8

## ANNEXE 2

**Annexe 2.1.** Les résultats des essais de caractérisation du BAP à l'état frais et durci.

formulation	T <sub>500</sub> (sec)	Etatement (cm)	H2/H1	V funnel (sec)	Stabilité (%)	Résistance (Mpa)
<b>0% F</b>	<b>1.2</b>	<b>72</b>	<b>0.64</b>	<b>22.9</b>	<b>1.49</b>	<b>52.73</b>
<b>10% F</b>	<b>1.59</b>	<b>71.5</b>	<b>0.528</b>	<b>6.56</b>	<b>0.26</b>	<b>42.25</b>
<b>20% F</b>	<b>1.53</b>	<b>67</b>	<b>0.77</b>	<b>11.33</b>	<b>3</b>	<b>34.6</b>
<b>30% F</b>	<b>1.75</b>	<b>66.5</b>	<b>0.52</b>	<b>14.88</b>	<b>0.6</b>	<b>30.35</b>
<b>40% F</b>	<b>2.06</b>	<b>61.5</b>	<b>0.16</b>	<b>19.69</b>	<b>1.6</b>	<b>-</b>
<b>50% F</b>	<b>1.31</b>	<b>60</b>	<b>0.46</b>	<b>6.75</b>	<b>0.54</b>	<b>-</b>
<b>0% P</b>	<b>0.5</b>	<b>73</b>	<b>0.77</b>	<b>9.96</b>	<b>1.88</b>	<b>53.6</b>
<b>10 %P</b>	<b>0.57</b>	<b>74.5</b>	<b>0.52</b>	<b>13.47</b>	<b>5.72</b>	<b>47.2</b>
<b>20%P</b>	<b>0.37</b>	<b>69</b>	<b>0.48</b>	<b>19.28</b>	<b>1.47</b>	<b>42.95</b>
<b>30%P</b>	<b>0.69</b>	<b>74.5</b>	<b>0.71</b>	<b>3.13</b>	<b>0.33</b>	<b>37.65</b>
<b>40%P</b>	<b>4.62</b>	<b>58</b>	<b>0.12</b>	<b>26.53</b>	<b>0</b>	<b>-</b>
<b>50%P</b>	<b>infinie</b>	<b>49</b>	<b>0</b>	<b>blocage</b>	<b>0</b>	<b>-</b>



## RESUME

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a pour objectif d'étudier l'influence des additions et des adjuvants sur les propriétés aux états frais et durci des bétons ordinaires et autoplaçants.

Dans une première approche de la problématique, il fallait d'abord proposer une formulation de béton ordinaire, suivit d'une proposition de formulation de béton autoplaçant. Ces formulations ont été retenues pour étudier l'influence de l'ajout des fillers calcaires ainsi que la pouzzolane sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons formulés avec un dosage optimal des différents types d'adjuvants utilisés. Les additions sont ajoutées aux mélanges comme une substitution du ciment à différents pourcentages.

Nous avons d'une part, caractérisé les bétons à base de matériaux locaux, confectionnés au laboratoire à l'aide d'essais simples, notamment l'essai au cône d'Abrams, l'essai d'étalement, l'essai de la boîte en L, l'essai V-funnel ainsi que l'essai de la stabilité au tamis et d'autre part, déterminé les caractéristiques mécaniques de l'ensemble des mélanges confectionnés.

**Mots clés :** adjuvant, addition, béton, ouvrabilité, résistance mécanique.

## Abstract

The research presented in this paper aims to investigate the influence of additions and admixtures on the properties for fresh and hardened states of ordinary and self-compacting concrete.

At a first look at the problem, we have first to propose a formulation of the ordinary concrete, followed by the self-compacting concrete formulation of proposal. These formulations have been held to study the influence of the addition of limestone and pouzzolan on rheological and mechanical properties of the concretes formulated with an optimal percentage of different types of used additives. Additions are added to the mixtures as a substitute to cement with different percentages.

We have on one a side, characterized the concretes based on local materials, made in the laboratory using simple experiences, such as the experience of Abrams cône, the spreading test, the test of L box, V- Funel test and the stability experience of the sieve and on other side, to determine the mechanical characteristics of the whole mixtures made.

**Keywords:** additive, addition, concrete, workability, strength

## ملخص

البحوث المقدمة في هذه المذكرة تهدف إلى دراسة تأثير الإضافات و المواد المساعدة على خصائص في الحالة الرطبة والصلبة من الخرسانة العادية و الخرسانة الذاتية الرس.

كتماش أولي مع الإشكالية كان يجب اقتراح تركيبة من الخرسانة العادية يتبعها اقتراح لتركيبية للخرسانة الذاتية الرس هاته التركيبات لدراسة تأثير إضافة الحجر الجيري و البوزلان على الخواص الانسيابية و الميكانيكية للخرسانة وضعت مع المزيج الأمثل من أنواع مختلفة من المواد المساعدة المستخدمة. تضاف الإضافات إلى خليط من الأسمنت باعتبارها بديلا بنسب مختلفة.

عندنا من جهة تمييز خرسانة تعتمد على الوسائل المحلية المنتجة بالمخبر اعتمادا على تجارب بسيطة مع تجربة مخروط ابرامز، تجربة البسط، و تجربة العلية على شكل حرف ل، و تجربة ف فونال، إضافة إلى تجربة التوازن في الغربال، و من جهة أخرى تحديد المميزات الميكانيكية لمجموعة الخلطات المركبة.

**كلمات البحث:** المواد المساعدة، الإضافات، لخرسانة، قابلية، قوة ميكانيكية.

